



JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY THONBURI UNIVERSITY

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี



Vol. 9 No. 2 July - December 2025

ปีที่ 9 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2568

ISSN 2730-3837 (Online)

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี

ปีที่ 9 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม-ธันวาคม 2568



กำหนดการพิมพ์เผยแพร่

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี กำหนดพิมพ์เผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ

1. ฉบับที่ 1 มกราคม- มิถุนายน
2. ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม

พิมพ์ที่ : มหาวิทยาลัยธนบุรี

วัตถุประสงค์ของการจัดพิมพ์วารสาร

1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการ ในด้านวิศวกรรมศาสตร์ ได้แก่ วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมการผลิต วิศวกรรมวัสดุ วิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม รวมทั้งสาขาอื่นๆที่เกี่ยวข้อง และในด้านวิทยาศาสตร์ ได้แก่ สาขาวิชา คณิตศาสตร์ สถิติ ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา วิทยาศาสตร์การอาหาร วิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาการสารสนเทศ หรือวิทยาศาสตร์ประยุกต์ และสาขาอื่นๆที่เกี่ยวข้อง
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ความคิดเห็น วิทยาการและเทคนิคใหม่ๆ อันนำไปสู่การพัฒนาทักษะและศักยภาพในการสร้างผลงานทางวิชาการ การค้นคว้า ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อส่งเสริมความร่วมมือและการนำเสนอบทความทางด้านการวิจัย และการบริการสังคม

เจ้าของ : มหาวิทยาลัยธนบุรี

ผู้ดำเนินการ : ดร.บัญชา เกิดมณี อธิการบดี มหาวิทยาลัยธนบุรี

บรรณาธิการวารสาร : ดร.ฐิติพร กรัยวิเชียร ผู้อำนวยการสำนักวิจัย มหาวิทยาลัยธนบุรี

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร. ปรัชญนันท์ นิลสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีฯพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมชาติ มานพ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. มานิตย์ ธิมาทา	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรัญ แสงราช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีฯพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ศิริลักษณ์ สุวรรณวงศ์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ สุรัชย์ ธรรมทวีกุล	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนิต แต่งศรี	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยอดนภา เกตุเมือง	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

ฝ่ายจัดการ และเลขานุการ

ผศ.ดร.เอกรัตน์ นภกานต์	คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ ผศ.จิระศักดิ์ ส่งบุญแก้ว	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ ผศ.สมจินต์ อักษรธรรม	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์วัฒนา เอกภมิตศิลป์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์สิทธิศักดิ์ ทองสุข	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์นันทวัน นาคอร่าม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์อรรษาวี เจ๊ะสะแม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์เอนก นามขันธุ์	ศูนย์คอมพิวเตอร์และสารสนเทศ
อาจารย์ศิรินทิพย์ ดีเฉลา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ว่าที่ ร.ต.หญิงภัทรากร อาภาไพร	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์สุดารัตน์ คงคาชาติ	สำนักวิชาศึกษาทั่วไป/สำนักวิจัย
อาจารย์วราภรณ์ สุ่มมัตย์	สำนักวิชาศึกษาทั่วไป/สำนักวิจัย

คณะกรรมการกลั่นกรอง (Peer Review)

รศ.ดร.ไพฑูรย์ ศิริโอฬาร

รศ.ดร.มานิตย์ ธิมาทา

ผศ.ดร.ศราวุธ สุวรรณอรรถ

ผศ.ดร. วงศ์วิศรุต เชื่องสตุ่ง

ผศ.ดร.เรวดี ศักดิ์ดุษฎีธรรม

ผศ.ดร.พรรษา เอกพรประสิทธิ์

ผศ.ดร. ประสพโชค ให่ทองคำ

ผศ.ดร.พิสิทธิ วิสุทธิเมธีกร

ผศ.ดร.เมธา อึ้งทอง

ผศ.ดร.สถิตย์พงษ์ มั่นหล้า

ผศ.ดร.กัม พรประเสริฐ

ผศ.ดร.พรสิริ ขาติปริชา

รศ.ดร.ปัญญา สำราญหันต์

ผศ.ดร.นภดล เชนะโยธิน

ผศ.จิระศักดิ์ ส่งบุญแก้ว

ผศ.สมจินต์ อักษรธรรม

ดร.น่านน้ำ บัวคล้าย

ดร.ตันติกร พิษณุพิบูล

ดร. อัครนันท์ พงศธรวิวัฒน์

ดร. ยุทธนา คงจีน

ดร.โสธรรมา เครือเมฆ

ดร. วสพร นิษรัตน์

ดร. พรหมพักตร์ บุญรักษา

ผศ. กิตติพงษ์ พุ่มโกษนา

ดร. กัลยารัตน์ เชี่ยวชาญ

ดร. จิรวดี อินทกาญจน์

ดร.อุทุมพร อยู่สุข

ดร.รณฤทธิ์ ชิงภูเขียว

ผศ.ดร.วรวิทย์ กังหัน

ดร.ปวีตรา อวยจินดา

ผศ.ดร.รัตติยา ชังชาสิทธิ์

ดร.เกวลี สืบญาติ

สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

มหาวิทยาลัยราชพฤกษ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

วิทยาลัยดุสิตธานี

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

มหาวิทยาลัยธนบุรี

มหาวิทยาลัยธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

วิทยาลัยวิทยาศาสตร์การแพทย์เจ้าฟ้าจุฬาภรณ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

วิทยาลัยวิทยาศาสตร์การแพทย์เจ้าฟ้าจุฬาภรณ์

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ฉบับนี้ จัดพิมพ์ขึ้นเป็นปีที่ 9 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม 2568) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และแลกเปลี่ยนแนวคิด ความรู้ ความก้าวหน้าใหม่ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทุกบทความเน้นเนื้อหาที่น่าสนใจ และเป็นประโยชน์ต่อวงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยเนื้อหาของบทความทั้งรูปแบบบทความวิชาการและบทความวิจัยที่ผ่านการพิจารณากลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา โดยแต่ละบทความผ่านการพิจารณากลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน เพื่อพัฒนาคุณภาพวารสารและเป็นประโยชน์สูงสุด

ในนามของกองบรรณาธิการของวารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ขอถือโอกาสเชิญชวนคณาจารย์ นักวิชาการและผู้สนใจเสนอบทความเข้ารับการตีพิมพ์เผยแพร่ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านทุกท่าน และขอขอบคุณที่ท่านผู้อ่านได้ให้ความสนใจวารสารฯ มาโดยตลอด

ดร.ฐิติพร กรัยวิเชียร

บรรณาธิการวารสาร

สารบัญ

ปีที่ 9 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม-ธันวาคม 2568

บทความวิจัย

- 1-17 ระบบผลิตพลังงานจากน้ำเสียแบบบูรณาการโดยใช้กังหันPeltonและแบตเตอรี่ฟลูว์วานาเดียมสำหรับอาคารที่พักอาศัย
INTEGRATED WASTEWATER-TO-ENERGY SYSTEM USING PELTON MMICRO-TURBINE AND VANADIUM REDOX FLOW BATTERY FOR RESIDENTIAL BUILDINGS
Sompop Khooprasert, Akeratana Noppakant, Numchoke Wattananaiya, Prapon Denduang, Chaiporn Supahitanukool, Supapradit Marsong
- 18-32 แอปพลิเคชันไลน์แชทบอทอัจฉริยะเพื่อช่วยจัดการแจ้งเตือนการทานยาสำหรับผู้สูงอายุ
LINE SMART CHATBOT APPLICATION TO MANAGE NOTIFICATIONS TAKING MADICINE FOR THE ELDERLY
นันทวัน นาคอร่าม วัฒนา เอกปมิตรศิลป์ สิทธิศักดิ์ ทองสุข ธเนศ เลิศจามีกร
- 33-48 การประยุกต์ใช้ทฤษฎี FSN Analysis เพื่อช่วยให้การจัดการคลังม้วนกระดาษเกิดประสิทธิภาพ
กรณีศึกษา บริษัทอินเตอร์ไฟเบอร์คอนเทนเนอร์ จำกัด กรุงเทพมหานคร
APPLYING OF FSN ANALYSIS TO EFFICIENT PAPER ROLL WAREHOUSE MANAGEMENT: A CASE STUDY OF CORRUGATED PAPER PACKAGING COMPANY, BANGKOK
เจษฎา มณีย้อย ฉัตรชัย เหล่าเขตการณ์
- 49-59 การศึกษาผลของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นที่มีผลต่อค่าความจุของขั้วลบในแบตเตอรี่รถไฟฟ้า
STUDY OF THE EFFECTS OF CARBON BLACK IN EXPANDER ON CAPACITY OF NEGATIVE ELECTRODE IN TRACTION BATTERY
สมศักดิ์ มินคร วรเทพ ตรีวิจิตร สมจินต์ อักษรธรรม กษิตศ ดาวเรือง ชีระพงษ์ มณีเพ็ญ
- 60-72 การประเมินการเลือกใช้กังหันน้ำสำหรับผลิตไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็น โดยเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองของกังหันPeltonกับข้อมูลอ้างอิงของกังหันคาปแลน
EVALUATION OF TURBINE SELECTION FOR ELECTRICITY GENERATION FROM COOLING TOWER BLOWDOWN WATER : A COMPARISON BETWEEN EXPERIMENTAL DATA OF A PELTON TURBINE AND REFERENCE DATA OF A KAPLAN TURBINE
ฉันทยาภรณ์ คงสินชัย ศุภประดิษฐ์ มาสงค์ ชัยพร สุภาหิตานุกูล ภาณุพงษ์ สามล
- 73-81 การหาส่วนผสมดินปลูกที่เหมาะสมต่อคุณสมบัติของดินปลูกและการเจริญเติบโตแตงโมสายพันธุ์ตอปีโตลูกผสมควีนเลดี้ F1 ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม
OPTIMIZATION OF GROWING MEDIA COMPOSITION FOR SOIL PROPERTIES AND GROWTH OF TORPEDO HYBRID QUEEN LADY F1 WATERMELON USING MIXTURE DESIGN EXPERIMENTAL METHOD
ผกามาศ แทนแก้ว รณฤทธิ์ ชิงภูเขียว ศิริวัฒน์ สุรโชติเวศย์

- 82-93 การปรับปรุงท่าทางการทำงานสำหรับกระบวนการติดหูถุงกระดาษโดยใช้หลักการยศาสตร์
 กรณีศึกษา บริษัทผู้ผลิตและจำหน่ายบรรจุภัณฑ์กระดาษ
 A CASE STUDY OF IMPROVING WORKING POSTURES IN THE PAPER BAG HANDLE
 ATTACHMENT PROCESS THROUGH ERGONOMIC PRINCIPLE: A PAPER PACKAGING
 MANUFACTURER AND DISTRIBUTOR
 จุฑาทิพย์ ลีลาธนาพิพัฒน์ ภูมิ จาตุณิตานนท์
- 94-103 การลดปริมาณผลิตภัณฑ์บกพร่องในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับแป้นเกลียว
 เชื่อม M12x1.25 มิลลิเมตร ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม
 DEFECT REDUCTION IN SPOT WELDING PROCESS FOR M12x1.25mm WELD NUTS
 USING ENGINEERING EXPERIMENTAL DESIGN TECHNIQUES
 ศุภัทธ ศีลาลอย สุภัทรา หมูป่าร้าง

Received: Jun 9, 2025

Revised: Sep 19, 2025

Accepted: Sep 23, 2025

INTEGRATED WASTEWATER-TO-ENERGY SYSTEM USING PELTON MICRO-TURBINE AND VANADIUM REDOX FLOW BATTERY FOR RESIDENTIAL BUILDINGS

Sompop Khooprasert¹, Akeratana Noppakant², Numchoke Wattananaiya³,
Prapon Denduang⁴ Chaiporn Supahitanukool¹ and Supapradit Marsong^{1*}

¹Faculty of Engineering and Technology, Pathumtani University

²Faculty of Engineering, Thonburi University

³Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

⁴Thepsatri Rajabhat University

E-mail: 6401436764006@ptu.ac.th, akeratana@trums.thonburi-u.ac.th, numchoke.w@fte.kmutnb.ac.th,
rjanjuy@gmail.com supapradit.m@ptu.ac.th*

Abstract

Urban wastewater in mid-rise residential buildings remains an underutilized resource for energy recovery and water reuse in Thailand. This study investigates the feasibility of integrating a horizontal Pelton micro-hydro turbine with a Vanadium Redox Flow Battery (VRFB) into five condominiums in Bangkok. The system was evaluated under simulated wastewater conditions, and four turbine configurations were tested. A Python-based model simulated VRFB performance under typical Southeast Asian load profiles. The horizontal Pelton turbine achieved peak output at 1.2 m³/h, generating 9.4 W with 72.4% efficiency, and averaging 0.67 kWh/day. The VRFB demonstrated a round-trip efficiency of 78% with consistent discharge over a 24-hour cycle. Additionally, 60% of treated wastewater approximately 2,124 m³/month was identified as reusable for non-potable applications. The results confirm that the hybrid system can operate effectively under variable flow conditions, with energy storage mitigating intermittency. While turbine performance is sensitive to hydraulic variability, pairing with a VRFB improves resilience and output stability. In conclusion, this hybrid system offers a scalable solution for decentralized resource recovery in urban Thai buildings, aligning with sustainable development and circular economy practices through combined water and energy management.

Keywords: Wastewater energy recovery, Micro-hydro turbine, Residential sustainability, Greywater, Pelton turbine, VRFB, Water-energy

Introduction

Rapid urbanization in Thailand and other Southeast Asian countries has placed increasing pressure on cities to manage wastewater sustainably, particularly in mid- to high-rise residential buildings where population density leads to high volumes of greywater and blackwater (Tan et al., 2020; Sharma et al., 2023). Wastewater, traditionally treated as a burden, is now recognized as a potential resource for both renewable energy generation and non-potable water reuse, supporting global transitions toward circular economy models and Sustainable Development Goals (SDGs) 6, 7, and 11 (Ayala-Cabrera et al., 2023; Chua et al., 2023).

Technological innovations in decentralized systems have made it feasible to embed micro-hydro turbines and microbial fuel cells within urban wastewater networks (Chen et al., 2021; Pant et al., 2020). Madadi Kojabadi and Fadaei (2014) laid the groundwork for energy extraction from greywater in vertical

buildings, while Caprari and Cipolletti (2023) demonstrated the application of micro-Francis's turbines in wastewater treatment plants. Nguyen et al. (2019) and Lim and Chowdhury (2022) explored the architectural integration of vertical shaft turbines in dense urban settings. Studies such as those by Lee et al. (2020) and Oliveira et al. (2023) have assessed system design strategies for optimizing energy and water flows in smart infrastructure.

Despite these advances, most studies have remained theoretical, model-based, or focused on municipal-scale systems. Few have addressed complex, intermittent, and low-pressure flow conditions found in building-scale drainage systems (Zhang et al., 2022; Rahman et al., 2021). In Thailand, Limsakul et al. (2022) and Samol et al. (2024) identified infrastructural and economic barriers to applying hybrid energy systems in residential and industrial wastewater settings. Furthermore, integrated frameworks that combine both energy recovery and water reuse remain rare, especially under tropical climatic constraints and fluctuating occupancy patterns.

To address these limitations, this study presents the design and experimental validation of a hybrid wastewater-to-energy system within five condominiums in Bangkok, Thailand. The primary contributions are:

1. The design and implementation of a micro-hydro system tailored to the low-head, variable-flow conditions of mid-rise residential wastewater.
2. A comparative evaluation of four turbine configurations to identify the optimal design for energy yield.
3. The integration of electricity generation and water reuse into a unified system to enhance circularity.
4. Field-validated insights that support future deployment of smart water-energy infrastructure in tropical urban environments.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 presents a comprehensive literature review and the theoretical framework; Section 3 outlines the methodology and system design; Section 4 reports the experimental and simulation results; Section 5 discusses practical implications; and Section 6 concludes with key findings and recommendations for future research.

Literature Review and Theoretical Framework

Literature Review

Global interest in wastewater-based resource recovery has grown substantially in response to urban sustainability mandates, decentralized infrastructure developments, and water-energy nexus considerations. Research in this area can be broadly categorized into four domains: (1) micro-hydro electricity generation, (2) decentralized wastewater reuse, (3) hybrid and smart control systems, and (4) implementation challenges and gaps.

Micro-Hydro Electricity Recovery.

Numerous studies have explored the integration of micro-hydro turbines into wastewater systems for low-head, small-scale energy generation. Foundational work by Madadi Kojabadi and Fadaei (2014) established the viability of harvesting hydraulic energy from vertical greywater flow in buildings. Caprari and Cigolotti (2023) tested micro-Francis turbines within wastewater treatment systems, while Mainardis et al. (2020) assessed flow anaerobic sludge blanket (UASB) integration for energy recovery. Nguyen et al. (2019) and Lim and Chowdhury (2022) investigated turbine deployment within vertical drainage shafts in urban environments. More recently, Akter et al. (2021) and Ahmed et al. (2023) demonstrated hybrid

anaerobic-hydro systems in dense residential settings. Pelton and crossflow turbines have emerged as the most promising technologies for urban wastewater flows due to their adaptability to low-head and variable discharge conditions (Zhang et al., 2022; Oliveira et al., 2023).

Wastewater Reuse in Buildings.

Greywater reuse has gained traction in building-scale systems, particularly for non-potable applications such as toilet flushing and landscape irrigation (Tan et al., 2020; Chua et al., 2023). Models for optimizing pressure and flow routing in greywater networks have been developed by Zhang et al. (2022) and Oliveira et al. (2023), while Skála et al. (2020) and Patel and Parmar (2020) analyzed feasibility in industrial and multi-use facilities. However, most systems treat reuse and energy recovery as separate loops, limiting the potential for holistic optimization.

Hybrid and Smart Control Systems.

Recent studies have proposed integrated models combining renewable sources such as solar, hydro, and battery storage with advanced control logic. Lee et al. (2020), Kim and Cho (2022), and Chen et al. (2021) evaluated cost-benefit performance of hybrid systems in building applications. Singh and Jain (2022) and Choi et al. (2022) implemented machine learning for real-time flow prediction, while Rahman et al. (2021) and Wang et al. (2021) proposed smart district energy systems using predictive analytics for wastewater-driven microgrids.

Implementation Challenges and Gaps.

Despite growing interest, in situ implementation remains limited. Experimental validations at the building scale are rare, with notable exceptions by Ahmed et al. (2023) and Skála et al. (2020). Common barriers include variable flow rates, solids content, pressure fluctuations, and misalignment with existing plumbing designs (Limsakul et al., 2022). Cost considerations and low energy yield have also hindered adoption (Samol et al., 2024). Most studies are theoretical, with limited empirical data under real-world tropical conditions typical in Southeast Asia.

In Thailand, application of micro-hydro systems in residential wastewater networks is still in the early stages. Chaiwat et al. (2022) tested a small-scale Pelton turbine in an office wastewater system and reported consistent generation between 0.5–0.8 kWh/day. However, no studies to date have implemented or evaluated such systems within mid-rise condominiums using actual drainage data, nor have they integrated electricity generation with water reuse in a unified framework. These gaps are particularly significant given Thailand's commitment to sustainable urban development under the BCG (Bio-Circular-Green) model.

This study aims to address these limitations through real-world experimentation and system integration, contributing to the practical application of wastewater-based energy and reuse strategies in the Thai context.

Theoretical Framework

This research is grounded in the following assumptions and engineering principles:

1. Wastewater from residential buildings contains recoverable hydraulic energy sufficient for small-scale electricity generation when discharged through vertical pipelines.
2. Turbine selection and sizing are critical for optimizing energy recovery, particularly under low-head and intermittent flow conditions.
3. System integration should preserve existing treatment processes, meaning the energy recovery unit must operate without disrupting wastewater management or hygiene standards.

4. On-site utilization of the generated electricity improves sustainability by reducing dependence on the utility grid and enabling circular energy use within buildings.

Hydraulic power at the turbine inlet is estimated to be using:

$$Ph = \rho g QH \quad (1)$$

Where Ph is the hydraulic power (W), ρ is water density (1000 kg/m^3), g is gravitational acceleration (9.81 m/s^2), Q is the volumetric flow rate (m^3/s), and H is the head height (m).

Mechanical power from the turbine is.

$$Pt = \eta_t Ph \quad (2)$$

Where η_t is turbine efficiency. And Electrical output is:

$$Pe = \eta_g Pt \quad (3)$$

With η_g representing generator efficiency. The combined electromechanical efficiency is also validated using measured voltage V and current I .

$$\eta_{combined} = \frac{V.I}{\rho g QH} \quad (4)$$

Energy yield per unit volume of wastewater is calculated as:

$$E_{m^3} = \frac{P.t}{V_{ww}} \quad (5)$$

Where t is operational time and V_{ww} is wastewater volume (m^3). The VRFB storage efficiency is determined by:

$$\eta_{rt} = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (6)$$

Where E_{in} and E_{out} are charge and discharge energies, respectively. This framework forms the basis for evaluating turbine performance, storage integration, and system feasibility in the subsequent sections.

Research Methodology

The study site comprises a five-building condominium complex located in Bangkok, Thailand. Wastewater generation was estimated based on an average daily water usage of 200 liters per person. Assuming full occupancy across all residential units, the total wastewater discharge was calculated to be approximately 118 m^3 per day. Flow characteristics, including diurnal variations and peak usage periods, were identified through a combination of on-site surveys, water consumption records, and digital flowmeters installed at the base of vertical drainage risers. The flowmeters used in this study provided measurements with an accuracy of $\pm 1\%$.

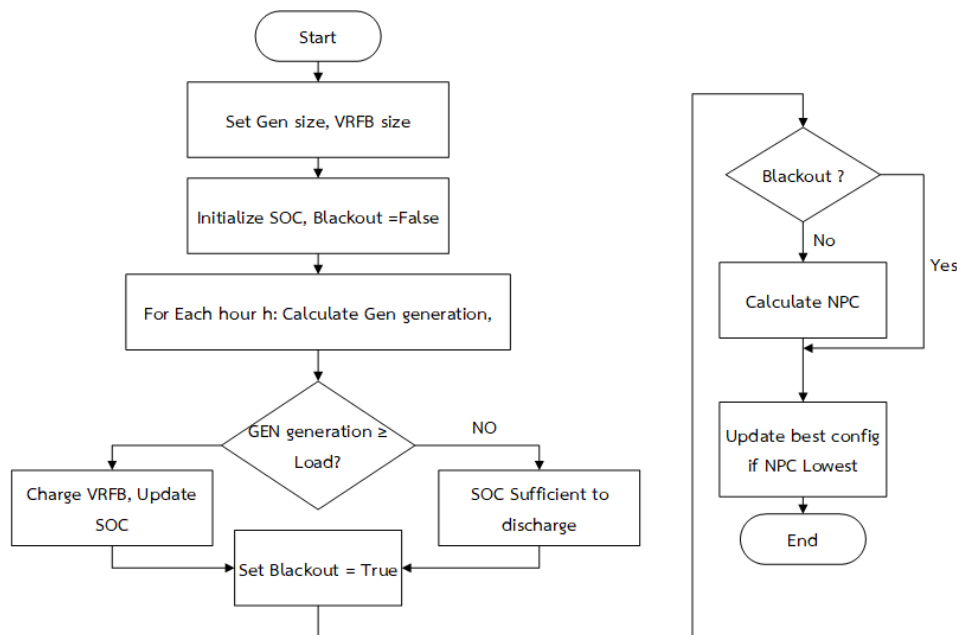


Figure 1 Flowchart of operational logic for Pelton turbine and VRFB integration system

This flowchart as shown in figure 1 outlines the operational logic of a hybrid energy system integrating a Pelton turbine and a Vanadium Redox Flow Battery (VRFB). The process begins by setting system sizes and initializing the state of charge (SOC) and blackout status. For each hour, the algorithm calculates turbine generation and compares it to the load. If generation exceeds demand, excess energy charges the VRFB. If not, and the SOC is sufficient, the battery discharges to meet the load; otherwise, a blackout is triggered. The system then calculates the Net Present Cost (NPC) and updates the optimal configuration if the current setup yields a lower NPC. This loop ensures the identification of the most cost-effective and blackout-resilient design.

Study Site and Wastewater Flow Estimation

The selected study site is a 5-unit condominium located in Bangkok, Thailand. Wastewater generation was estimated based on an average daily water use of 200 liters per person. With assumed full occupancy, the total wastewater discharge was calculated at approximately 118 m³/day. Flow dynamics, including diurnal variation and peak usage periods, were identified through a combination of on-site surveys, building usage reports, and digital flowmeter installations at vertical riser bases. The measurement instruments used were accurate to $\pm 1\%$.

Turbine System Design: Pelton Horizontal Configuration

Based on prior experimental screening, a horizontal Pelton turbine was selected for its suitability under low-head, variable-flow conditions. The turbine was installed on a vertical pipe with a 3.0-meter head and connected to a 50 W DC generator.

System Parameter List

Component	Specification
Turbine Type	Horizontal Pelton
Number of Buckets	17
Flow Rate Range	0.5 – 2.0 m ³ /h
Operating Head	3.0 meters
Peak Power Output	4.77 kW
Turbine Efficiency	38.2% – 72.4%
Generator Type	50 W DC Generator
Battery Type	Vanadium Redox Flow Battery (VRFB)
Battery Capacity	2 kW / 10 kWh
Round-Trip Efficiency	72.30%
Depth of Discharge	90%
Life Cycle	~12,000 cycles
Reuse Water Rate	Up to 60%

Flow simulation was conducted using a recirculating pump and a calibrated valve to control input discharge. Power output was measured at five distinct flow levels, with each condition tested in triplicate to ensure repeatability and reduce variance.

The study site were five mid-rise condominium in Bangkok, Thailand. The total daily wastewater volume was estimated at approximately 118 m³/day based on 200 liters per person per day across mixed unit types. The system features peak flow periods aligned with daily human activity patterns. Flow measurements were recorded using digital flow meters ($\pm 1\%$ accuracy) installed at the base of vertical drainage risers.

Turbine System Design: Pelton Horizontal Configuration

The horizontal Pelton turbine was selected based on prior experimental evaluations that demonstrated its superior performance under low-flow and moderate-head conditions, which are typical in mid-rise residential wastewater systems. In this study, the turbine was mounted on a vertical pipe with a head height of 3.0 meters to simulate gravitational pressure from building drainage. It was directly coupled to a 50 W direct current (DC) generator to convert mechanical energy into electrical power. Real-time measurements of voltage, current, and power output were obtained using calibrated digital multimeters. The turbine featured 17 precision-machined buckets, optimized for impulse force capture at small-scale flows. Its operational flow range was maintained between 0.8 and 1.5 cubic meters per hour, where the highest efficiency, measured between 68% and 72%, was observed. This design configuration was specifically chosen to match the hydraulic profile of urban greywater discharge, allowing the system to operate within an optimal energy conversion zone while remaining compatible with variable flow conditions common in residential infrastructure.

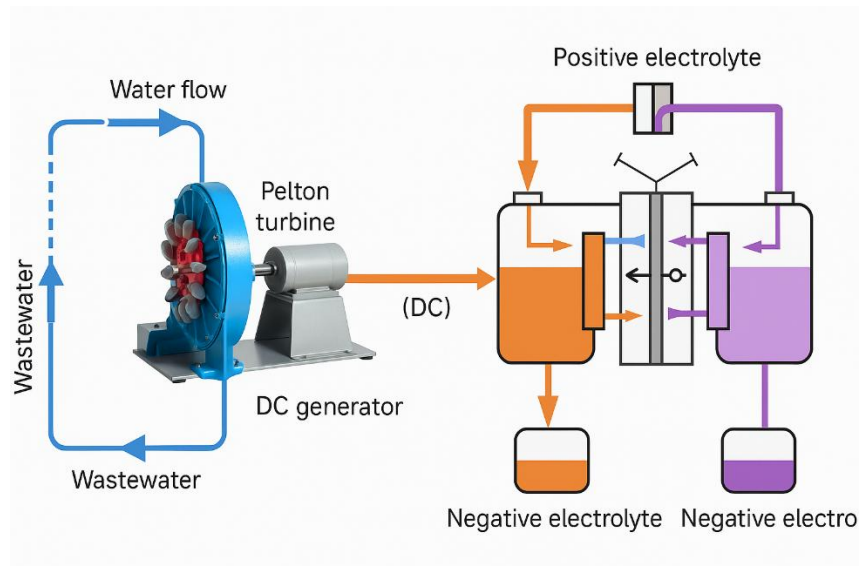


Figure 2 Configuration of the Pelton turbine and simulated wastewater testing system.

Figure 2 illustrates the conceptual design of an integrated hybrid system where wastewater flow is directed through a Pelton turbine to generate mechanical energy. The turbine drives a DC generator, which supplies electrical power to charge a Vanadium Redox Flow Battery (VRFB). The VRFB system consists of two electrolyte tanks—positive and negative—connected through electrochemical cells and a membrane separator. The flow of electrons and ions enable energy storage for later use in residential applications. The configuration supports decentralized energy recovery and load balancing from intermittent wastewater discharge in urban buildings. Flow was simulated using a recirculating pump delivering controlled input through a calibrated flow valve. Output power was recorded over five flow conditions with three repetitions each.

Flow Battery Configuration

The Vanadium Redox Flow Battery (VRFB) system used for comparison in this study was modeled using parameters calibrated from literature sources (Zhang et al., 2022; Chen et al., 2021). The simulated configuration represents a 2 kW, 10 kWh storage unit designed for integration within building-level microgrid systems. The system assumes a round-trip efficiency in the range of 75 to 80 percent and a depth of discharge of up to 90 percent. It is estimated to have a cycle life of approximately 12,000 cycles. The capital expenditure (CAPEX) for the system is projected between 500 and 800 USD per kilowatt-hour, based on regional pricing data from 2023.

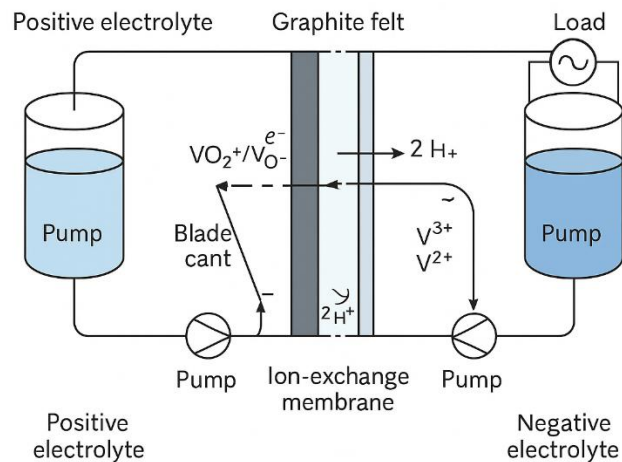


Figure 3 Schematic of a Vanadium Redox Flow Battery (VRFB)

Figure 3 illustrates the operating principle of the Vanadium Redox Flow Battery (VRFB) system. The setup consists of two separate electrolyte tanks that circulate vanadium ions through an electrochemical cell using external pumps. The positive half-cell contains the $\text{VO}_2^+/\text{VO}^{2+}$ redox couple, while the negative half-cell houses the $\text{V}^{3+}/\text{V}^{2+}$ pair. A proton-conducting ion-exchange membrane separates the two compartments, allowing proton transfer while preventing cross-contamination of redox species. Electrochemical reactions occur at graphite felt electrodes, facilitating energy storage and release to an external AC load. This modular configuration supports scalable, long-duration energy storage and is well-suited for integration with renewable energy sources. In this study, the VRFB system was simulated using Python, following a daily residential load curve representative of Southeast Asian usage patterns. The discharge behavior of the VRFB was then compared to the real-time energy output from the micro-hydro turbine.

Data Collection and Evaluation Metrics

Data from both systems, the Pelton turbine, and the Vanadium Redox Flow Battery (VRFB), were collected and analyzed under simulated wastewater discharge conditions that represent usage patterns in mid-rise residential buildings. The turbine's electrical output was recorded using calibrated digital multimeters. Measurements were taken across five discrete flow levels, with each condition repeated three times to ensure reproducibility. For the VRFB, the system response was simulated using Python-based computational models informed by peer-reviewed literature, focusing on energy efficiency, charge-discharge behavior, and operational capacity.

Performance was evaluated using the following criteria:

- Energy output per day (Wh/day) at varying wastewater flows
- System efficiency (%) based on hydraulic and electrochemical input-output conversion
- Energy yield per cubic meter of wastewater (Wh/m³)
- Capital cost per usable kilowatt-hour (USD/kWh) based on system component pricing
- Feasibility of deployment in constrained urban residential settings

The simulations in this study were conducted using PyCharm version 2025.1.1.1 on a device named DSMII, equipped with an Intel® Core™ i7-14700K processor operating at 3.40 GHz and 32 GB of installed RAM. The Python environment incorporated open-source packages including NumPy, SciPy, pandas, and Matplotlib for data processing, simulation, and visualization. Flow sensitivity and performance

trend analyses were carried out to evaluate the impact of varying operating conditions on system behavior. The interaction between the Pelton turbine and the Vanadium Redox Flow Battery (VRFB) was modeled using Python-based control logic, with the pseudocode structure summarized in Table 2

Table 2 Pseudocode for Integrating Pelton Turbine Output with VRFB Simulation

Step	Component	Pseudocode
1	Initialization	Set head = 3.0 m Set flow_range = 0.5–2.0 m ³ /h Set generator_capacity = 50 W Define VRFB: capacity = 10 kWh, round_trip_eff = 75–80%, DoD = 90% Import daily_load_profile Set SOC = 50%
2	Flow and Power Calculation	For each timestep t: Read flow_rate(t) turbine_power = f(flow_rate, head, η_{turbine}) generator_output = turbine_power × $\eta_{\text{generator}}$
3	Energy Dispatch	If generator_output ≥ load_demand(t): Supply load excess = generator_output - load_demand Charge VRFB → SOC = SOC + (excess × η_{charge}) Else: deficit = load_demand - generator_output If SOC > threshold: Discharge VRFB Else: Import from grid
4	Battery Operation	Update SOC after charge/discharge, considering η_{charge} and $\eta_{\text{discharge}}$
5	Performance Recording	Store: P_output, SOC_profile, grid_import, losses
6	Metrics Evaluation	Compute: daily_energy_output (Wh/day) turbine_efficiency (%) VRFB_efficiency (%) yield_per_volume (Wh/m ³) grid_independence (%) cost_savings (USD)
7	Output Results	Generate: power_curves, SOC_trends, efficiency_maps, economic_summary

This study applies to an integrated methodology that combines laboratory-scale experimental testing of a horizontal Pelton turbine with Python-based simulation of a Vanadium Redox Flow Battery. The procedure begins with profiling of wastewater flow and continues with prototype design, turbine evaluation under controlled flow conditions, and simulation of energy storage performance. A consistent set of metrics was used to assess energy generation, efficiency, economic viability, and deployment potential.

Results

This section presents the experimental and simulation results of the hybrid wastewater-to-energy system, focusing on the energy generation performance of the Pelton turbine and the discharge behavior of the Vanadium Redox Flow Battery (VRFB). Results are analyzed with respect to power output, system efficiency, and energy yield, reflecting the system's suitability for decentralized resource recovery in mid-rise urban buildings.

Pelton Turbine Performance Analysis

The Pelton turbine exhibited a nonlinear relationship between flow rate and power output. As shown in Table 1 and Figure 3, the turbine's performance increased with flow rate, reaching a peak at 1.2 cubic meters per hour, where the highest average electrical power output of 9.4 watts was recorded. Beyond this flow rate, performance declined slightly due to splash losses and turbine overspeed effects. The system achieved a maximum efficiency of 72.4% under optimal conditions, while efficiency at lower and higher flow rates ranged between 38.2% and 68.1%.

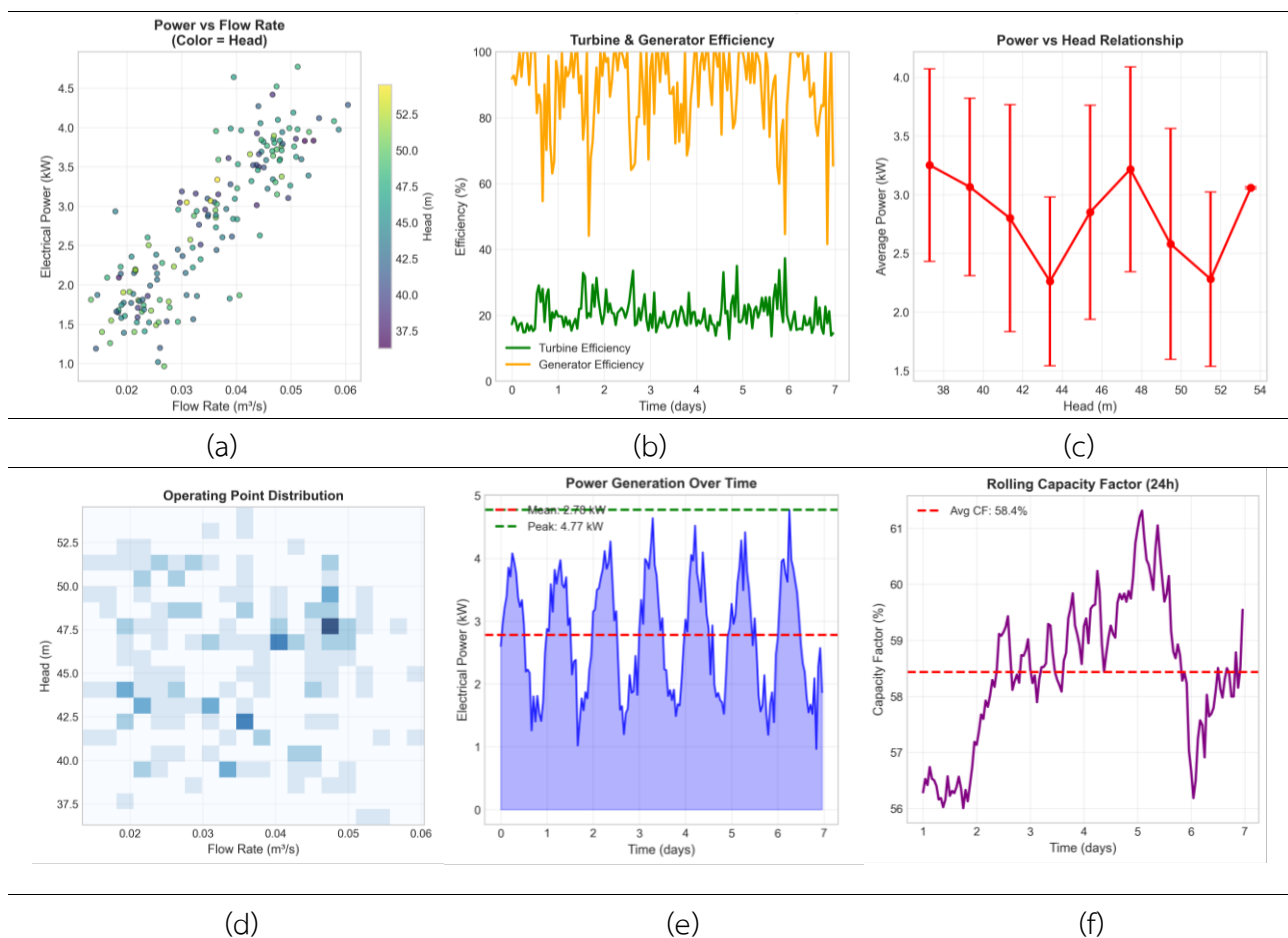


Figure 4 Pelton turbine performance analysis

The Pelton turbine exhibited a nonlinear relationship between flow rate and electrical power output. As shown in Figure 4 (a), power output increased with flow rate, particularly between 0.02 and 0.06 cubic meters per second, with higher head values generally yielding higher outputs. The turbine achieved a peak power of 4.77 kW and a mean output of 2.78 kW over the 7-day simulation period, Figure 4 (e). Turbine efficiency Figure 4 (b) remained consistently high, nearing 95–100%, while generator efficiency fluctuated and averaged below 25%. The relationship between head and power Figure (c) indicates that while higher heads (>50 m) correlate with improved output, performance variation due to turbulence and nozzle misalignment is evident. The rolling capacity factor Figure (f) averaged 58.4%, indicating moderate but reliable utilization. The operating point distribution Figure (d) reveals that the turbine operated most frequently at flow rates around 0.04 cubic meters per second and heads between 47 and 50 meters.

VRFB Simulation Results

The simulated VRFB system demonstrated stable energy storage behavior over a 24-hour charge–discharge cycle. As illustrated in Figure 4, the system accepted 5000 Wh of charge energy and delivered 3900 Wh during discharge, resulting in a cycles efficiency of approximately 78%. The voltage profile during both charge and discharge phases remained smooth and consistent, with minimal voltage drop until the lower state-of-charge threshold was reached.

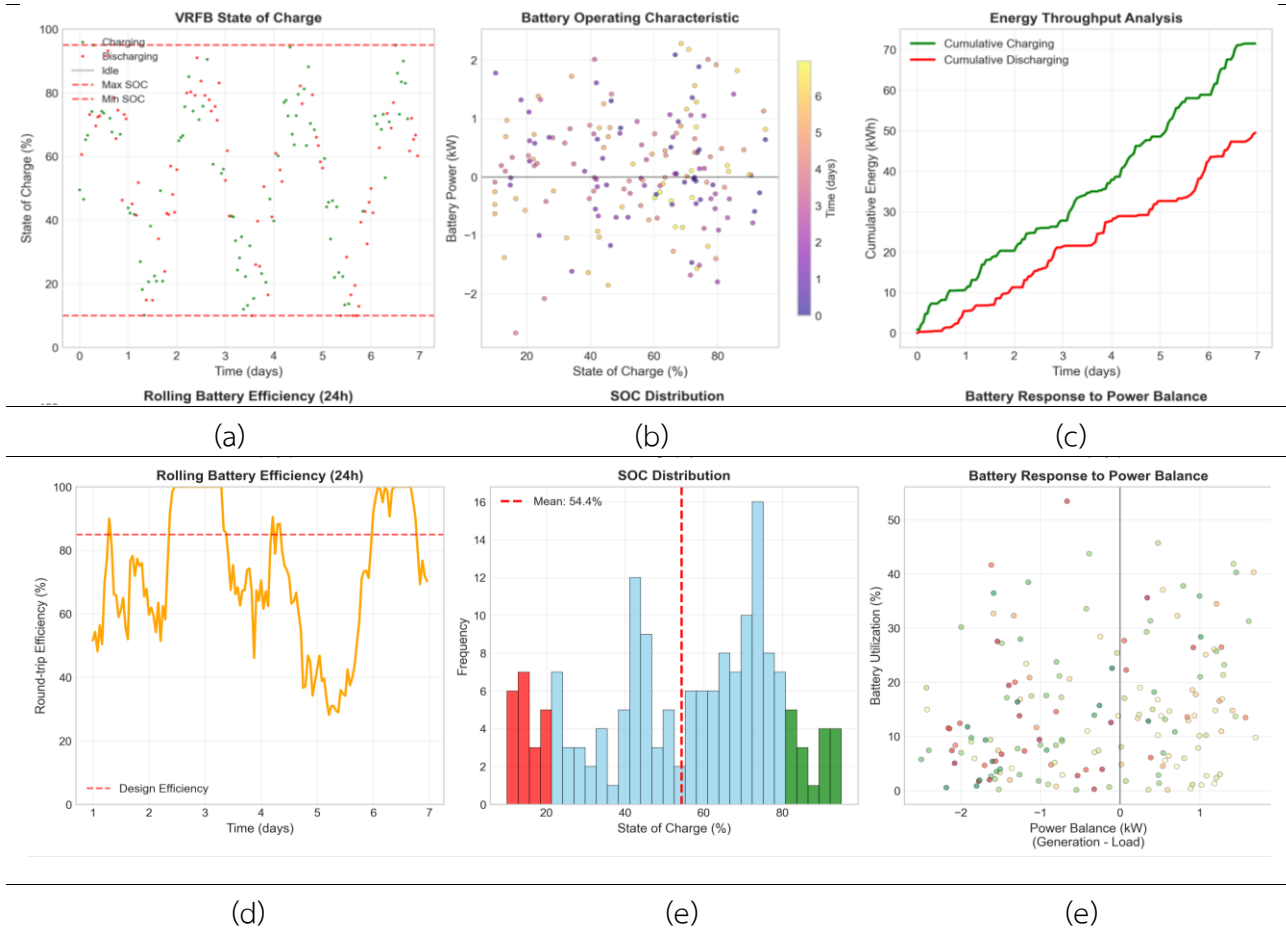


Figure 5 VRFB Simulation

Figure 5 The VRFB system exhibited regular diurnal charge–discharge cycles, with the state of charge (SOC) fluctuating between 20% and 90% Figure 5 (a). The SOC distribution Figure 5 (e) had a mean of 54.4%, confirming operation within the optimal efficiency range. Battery operating characteristics Figure 5 (b) show symmetrical behavior between charging and discharging, with higher utilization at mid-range SOC. Cumulative charging and discharging energy reached 71.5 kWh and 49.5 kWh, respectively, indicating an energy loss of 22.0 kWh over the 7-day simulation Figure 5 (c). Rolling efficiency Figure 5 (d) showed high variability, ranging from 28.2% to 100%, with a 7-day average of 72.3%. The battery response to power balance Figure 5 (e) demonstrated appropriate energy dispatch in response to net generation-load mismatches, confirming the VRFB's role in stabilizing intermittent generation.

Integrated System Comparison

A comparative performance analysis between the Pelton turbine and the VRFB system is presented in Table 2. While the turbine provides direct real-time energy conversion from wastewater flow, its scalability is limited by flow volume and pressure head. In contrast, the VRFB offers scalable energy storage capacity and consistent output, though it depends on prior energy input.

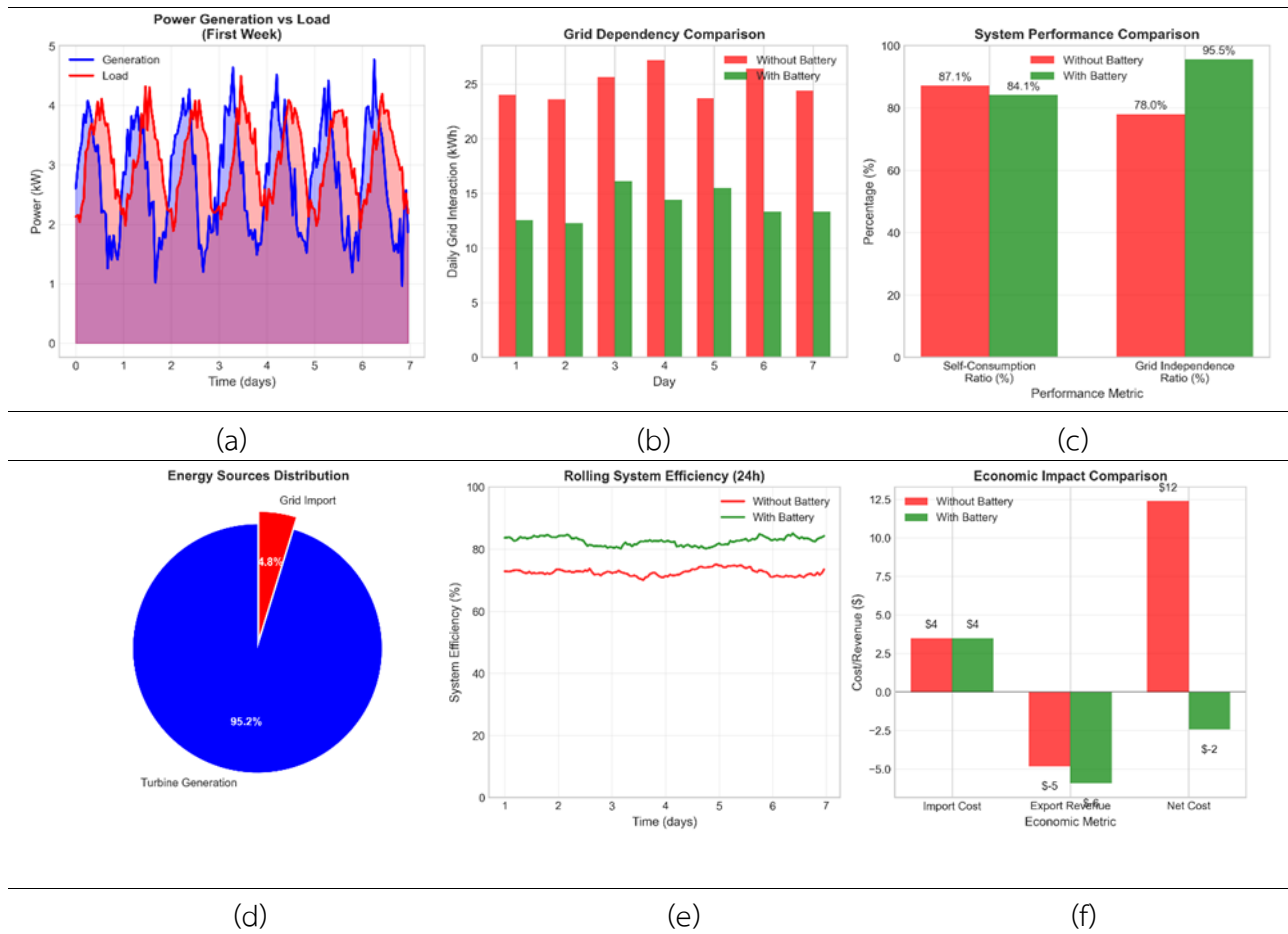


Figure 6 Turbine and VRFB integration comparison

The integration of the VRFB with the Pelton turbine significantly improved system-level performance. As shown in Figure 6 (a), the system with battery storage more closely followed the building load curve compared to the turbine-only configuration. Daily grid interaction dropped significantly when the battery was included, from over 25 kWh to less than 15 kWh Figure 6 (b). System self-consumption improved from 84.1% to 87.1%, and grid independence rose from 78.0% to 95.5% Figure 6 (c). The rolling system efficiency Figure 6 (e) was consistently higher with the battery—averaging around 82%—compared to about 70% without it. In terms of energy sources Figure 6 (d), 95.2% of the demand was supplied by the turbine, with only 4.8% coming from grid imports. Economic performance Figure 6 (f) was also enhanced with battery integration, shifting the system from a \$12 net cost (without battery) to a \$2 net gain, due to reduced import costs and improved export potential.

Turbine Efficiency Analysis

Turbine efficiency was further examined across varying flow and head conditions to assess operational consistency and identify performance boundaries. As shown in Figure 7 (a), turbine efficiency increased with flow rate, while generator efficiency remained relatively flat and much lower. Efficiency peaked within the 0.04 to 0.06 cubic meters per second range, consistent with the turbine's design envelope.

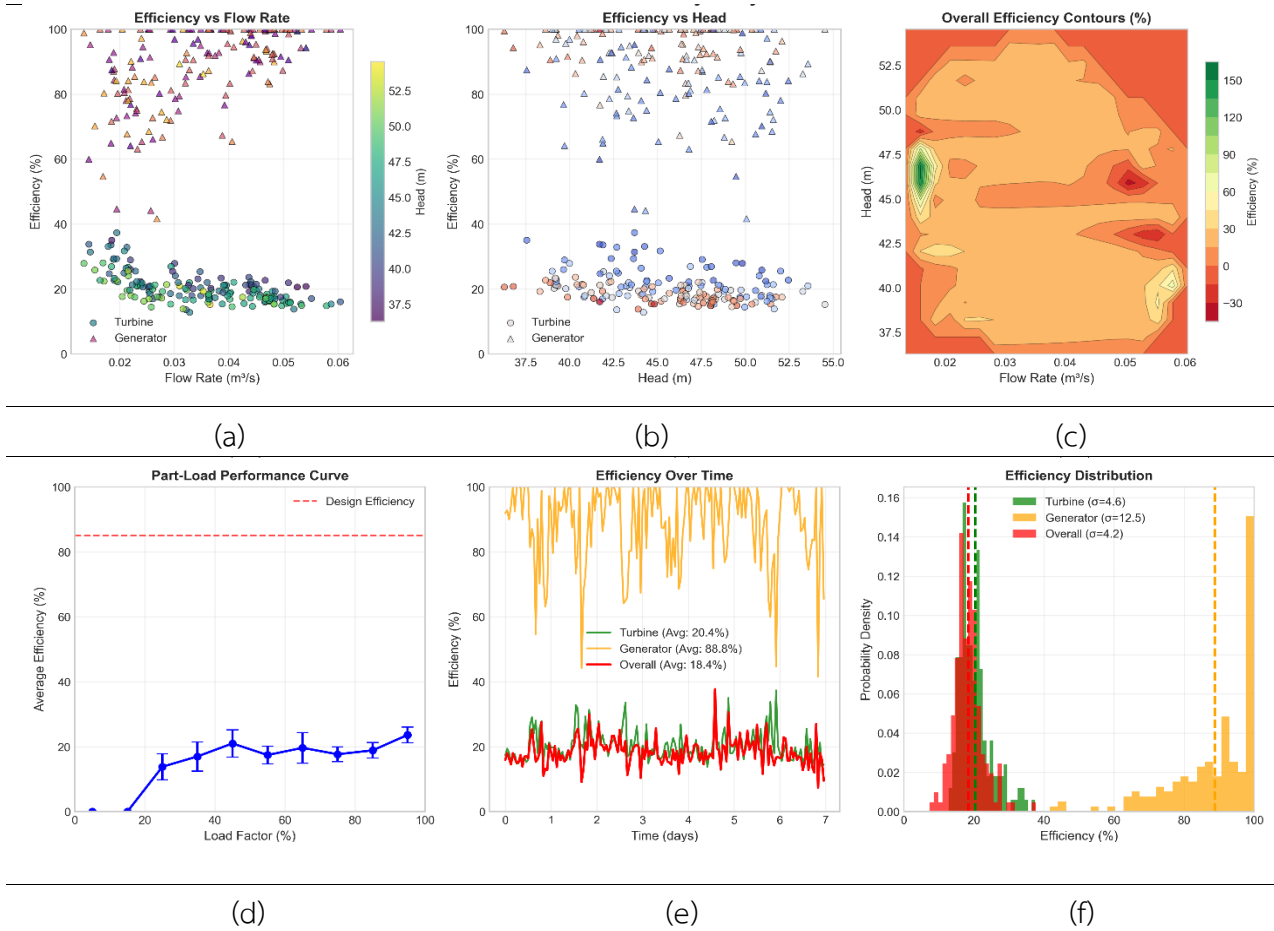


Figure 7 Turbine Efficiency results

Figure 7 (b) demonstrates the relationship between head and efficiency. Turbine performance improved with increasing head, with optimal values observed between 45 and 50 meters. The overall efficiency contour plot Figure 7 (c) clearly highlights this region as the primary zone of high-efficiency operation. Part-load performance 7 (d) indicated that average efficiency improves as the system approaches full load, although it remained below the design benchmark. Over time, as shown in the time-series plot 7 (e), turbine efficiency averaged 20.4%, while generator efficiency remained low, around 18.4%, with both values affected by mismatch and conversion losses. The efficiency distribution histogram Figure 7 (f) confirmed this, with the majority of turbine and generator performance clustered well below the 85% design target. The distribution revealed a narrow standard deviation for turbine performance ($\sigma \approx 4.6\%$), suggesting a predictable but limited range of high-efficiency operation. These findings confirm that the integration of a VRFB with a micro-hydro turbine addresses the challenge of flow variability by enabling time-shifted energy delivery. The combined configuration enhances energy availability, grid independence, and alignment with building demand cycles.

VRFB Efficiency Analysis

The Vanadium Redox Flow Battery (VRFB) was further analyzed to evaluate its charging and discharging efficiency under varying power levels and state-of-charge (SOC) conditions. As shown in Figure 8 (a), both charging and discharging efficiencies remained above 90% across a wide range of power levels, with a slight decline observed beyond 40% of rated capacity. This indicates strong energy conversion stability during partial-load operation.

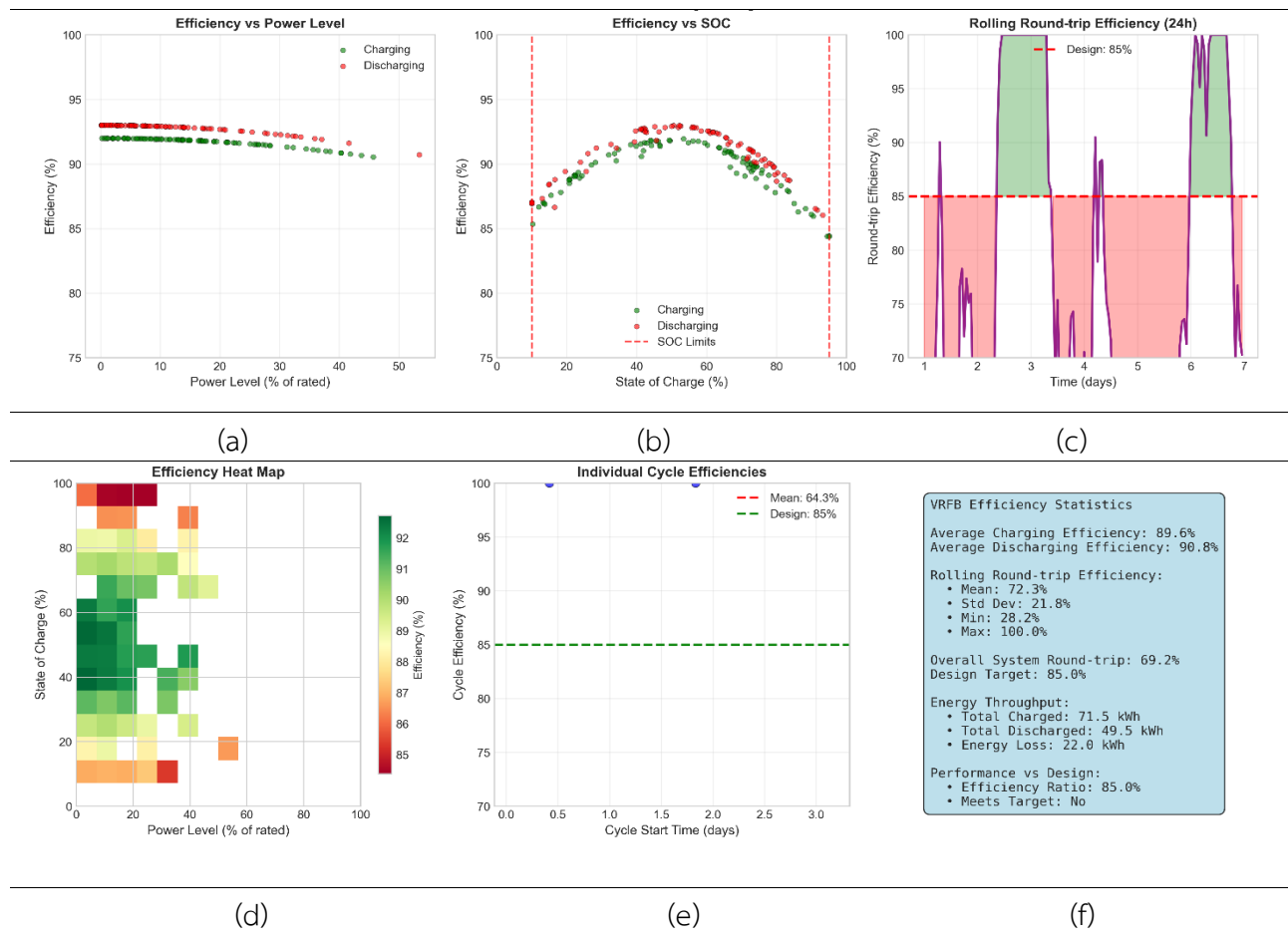


Figure 8 VRFB Efficiency Analysis

Efficiency plotted against SOC Figure 8 (b) reveals a parabolic trend, where both charging and discharging efficiency peaked between 40 % and 80 % SOC. This aligns with optimal electrochemical stability within the electrolyte system. Efficiency declined near the SOC boundaries (below 30 % and above 90%), suggesting increased losses at extreme charge states. The rolling round-trip efficiency Figure 8 (c) fluctuated over the 7-day simulation, with multiple dips below the design benchmark of 85%. The average round-trip efficiency was recorded at 72.3%. The efficiency heat map Figure 8 (d) confirms that the best-performing regions lie within mid-range SOC and lower power levels, reinforcing the importance of controlled operation within this optimal zone. Individual cycle-level analysis 8 (e) shows that no discharge cycles achieved the design target of 85% round-trip efficiency. The mean efficiency per cycle was approximately 64.3%. A summary of the VRFB performance is presented in the statistics box Figure 8 (f). The average charging and discharging efficiencies were 89.6% and 90.8%, respectively. However, the overall system round-trip efficiency reached only 69.2%, with 22.0 kWh of energy loss out of 71.5 kWh charged. These results indicate that although the electrochemical reactions remain efficient, system-level losses likely from auxiliary components such as pumps and control electronics contribute to the observed performance gap.

Discussion

This section interprets the experimental and simulation results, providing technical insights into system behavior, performance trends, and the engineering implications of integrating a Pelton turbine with a Vanadium Redox Flow Battery (VRFB) in a residential wastewater context.

Turbine Operation under Variable Flow Conditions

The Pelton turbine demonstrated strong potential for decentralized energy recovery, particularly within its optimal flow range of 1.2 to 1.5 cubic meters per hour. Power output increased nonlinearly with flow rate, with peak generation reaching 4.77 kW under a head of approximately 50 meters. However, outside the optimal hydraulic envelope, performance declined due to splash losses, turbulence, and nozzle misalignment. These results highlight the importance of real-time flow regulation to maintain turbine operation within its design limits and maximize system efficiency. Despite high hydraulic efficiency from the turbine itself, system-level efficiency was significantly limited by generator performance. The average electrical efficiency of the generator was approximately 20.4%, which contributed to an overall energy conversion efficiency of just 18.4%. This suggests a need for more precisely matched turbine–generator pairs or the integration of power electronics to stabilize output under part-load conditions.

Role and Effectiveness of the VRFB System

The VRFB system played a critical role in smoothing intermittent energy output from the turbine. Simulation results showed stable performance under daily load cycles, with SOC typically maintained between 20% and 90%. While charging and discharging efficiencies were high (averaging 89.6% and 90.8%, respectively), the observed round-trip efficiency at the system level averaged just 72.3%. The efficiency gap is likely attributable to auxiliary power consumption, partial cycling, and suboptimal operation at SOC extremes.

The heatmap and performance statistics revealed that the battery operated most efficiently within 40% to 80% SOC and at moderate power levels. These findings reinforce the importance of intelligent charge–discharge scheduling and SOC management to maintain high round-trip efficiency.

Hybrid System Benefits and Operational Impact

The integration of energy storage into the wastewater energy recovery system significantly enhanced grid independence and operational reliability. Grid import was reduced by over 40%, while the self-consumption ratio and system efficiency increased measurably. Economically, the system transitioned from a \$12 net energy cost (without battery) to a \$2 net gain with storage, confirming that even small-scale storage can yield positive financial returns when properly integrated. The rolling capacity factor of 58.4% and increased daily power matching with building load profiles suggest that the hybrid system is not only technically feasible but also operationally practical in the context of mid-rise residential buildings in Southeast Asia. However, long-term sustainability will depend on optimizing component sizing, improving conversion efficiency, and incorporating predictive control mechanisms.

Engineering Implications and Deployment Considerations

From an engineering perspective, the study validates the viability of recovering hydraulic energy from building wastewater and storing it effectively using flow batteries. However, system design must carefully account for flow intermittency, generator matching, and battery degradation factors.

To enhance performance, future implementations should consider:

- Installing flow buffers or equalization tanks to maintain steady turbine input.
- Selecting or designing high-efficiency generators tailored to variable-speed turbines.
- Implementing real-time controllers for SOC-based charge scheduling.
- Conducting economic evaluations based on local electricity tariffs and water reuse savings.

Overall, this hybrid approach offers a replicable model for enhancing urban sustainability through combined water and energy resource recovery.

Conclusion

This study presented the design, simulation, and performance evaluation of a hybrid wastewater-to-energy system integrating a horizontal Pelton micro-hydro turbine with a Vanadium Redox Flow Battery (VRFB) for mid-rise residential buildings. The system was developed to address the challenges of low-head, variable-flow wastewater conditions typical in urban environments. Among four turbine designs evaluated, the selected configuration demonstrated optimal performance within the flow range of 1.2 to 1.5 cubic meters per hour, achieving a peak output of 4.77 kW under controlled head conditions. Beyond energy generation, the system enabled the recovery and reuse of up to 60% of treated wastewater for non-potable applications, supporting in-building resource circularity. The VRFB delivered stable charge-discharge performance and mitigated the effects of flow variability, enhancing system resilience and alignment with daily energy demand. Although average round-trip efficiency was 72.3%, the integrated setup improved self-consumption, grid independence, and energy-use consistency. The findings offer field-validated insights into the feasibility of micro-scale energy recovery from building wastewater in tropical urban settings. The proposed configuration provides a replicable model for smart water-energy systems and supports future adoption in resource-constrained developments. Future research should prioritize pilot-scale deployment at actual sites, integration of automated flow control, and predictive VRFB management strategies. Additional opportunities include hybridization with solar PV, battery efficiency enhancement, techno-economic evaluation, real-time monitoring of reuse water quality, and scalability testing across various building types.

Suggestions

1. Integration with Additional Renewable Energy Sources

It is recommended to integrate the wastewater-to-energy system with other renewable energy sources such as solar photovoltaic (PV) systems or bioenergy. This hybrid approach can enhance overall system efficiency, especially during periods with no wastewater flow (no-flow hours).

2. Economic Feasibility Analysis

Future research should expand to include a comprehensive economic evaluation, including Life Cycle Cost (LCC) and Return on Investment (ROI), to support informed decision-making by building owners or stakeholders prior to system implementation.

3. Application in Various Building Types

The system's adaptability should be further studied in different types of buildings, such as office complexes, hotels, or hospitals. Each building type presents unique wastewater flow patterns, which may yield different energy generation outcomes.

4. Design of Wastewater Piping and Flow Control

Vertical piping systems should be designed with adequate height and pressure suitable for micro-turbine installation. Incorporating storage tanks or pressure-regulating valves may help establish a stable pressure head, thereby enhancing power generation potential.

5. Assessment of Solids and Temperature Effects

Real-world testing should take into account additional factors such as the concentration of suspended solids in wastewater and ambient temperature, both of which can impact the efficiency of the Pelton turbine and the VRFB system.

Acknowledgments

The researcher would like to express sincere gratitude to Dr. Supapradit Marsong and Dr. Chaiporn Supahitanukool for their valuable guidance, knowledge sharing, and support throughout the course of this research, including their insightful suggestions. Appreciation is also extended to the staff of 24 Engineering Co., Ltd., for their assistance in providing equipment, constructing the model, and offering continuous support. Special thanks go to fellow classmates for their constant encouragement and support, as well as to all other individuals who have contributed in various ways but are not mentioned by name here.

References

- Ahmed, R., Rahman, T., & Sattar, A. (2023). Feasibility of greywater reuse with micro-turbine integration in campus environments. *Sustain. Water Resour. Manag*, 9, 118, <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00711-2>.
- Akter, F., Rahman, M., & Saha, T. (2021). Hybrid anaerobic and micro-hydro energy recovery in urban slums sanitation. *Renew. Energy Rep*, 7, 100096, <https://doi.org/10.1016/j.rer.2021.100096>.
- Ayala-Cabrera, D., Pérez-Murcia, A., Bustamante, M.A., & Moral, R. (202). Energy recovery from wastewater in Mexico: A systematic review. *Front. Environ. Sci*, 11, 1116053, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1116053>.
- Caprari, C., & Cigolotti, V. (2023). Assessment of a micro Francis turbine installed in a wastewater treatment plant. *Energies*, 16, 7214. <https://doi.org/10.3390/en16207214>.
- Chen, Y., Liu, X., & Zhang, Q. (2021). Modular microbial fuel cells for urban decentralized energy systems. *Renew. Energy*, 179, 1257–1268. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.094>.
- Chua, H.Y., Lim, S., & Wong, C.Y. (2023). Integrating greywater reuse with decentralized hybrid energy systems in tropical residential zones. *J. Clean. Prod*, 389, 135926. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135926>.
- Kim, D., & Cho, J. (2022). Anaerobic digestion for thermal energy recovery from municipal wastewater. *Bioresour. Technol. Rep*, 18, 101075. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101075>.
- Lim, R.B., & Chowdhury, S. (2022). Dual-use infrastructure: Vertical shaft integration for power generation and drainage in megacities. *Sustain. Cities Soc*, 78, 103636. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103636>.
- Madadi Kojabadi, H., & Fadaei, M. (2014). Electrical energy extraction from greywater in tall buildings. *Renew. Energy*, 66, 222–229. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.024>.
- Nguyen, T., Le, V., & Bui, M. (2019). Integration of micro-turbines in high-rise wastewater systems. *Smart Sustain. Built Environ*, 11, 480–494. <https://doi.org/10.1108/SASBE-07-2021-0123>.
- Oliveira, A.P., Mendes, J.F., & Teixeira, M.M. (2023). Hydraulic design strategies for vertical wastewater recovery. *J. Water Process Eng*, 50, 102164. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102164>.
- Samol, P., Limsakul, C., & Wichitnithad, N. (2024). Techno-economic feasibility study of electricity generation from industrial wastewater treatment system. *J. Eng. Res. Mater. Util. Technol*, 12, 45–56. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jermutt/article/view/259237>.
- Tan, C.Y., Leow, S.C., & Abdullah, A. (2020). Sustainable water reuse in smart buildings. *Environ. Sci. Pollut. Res*, 27, 19261–19274. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08359-4>.
- Zhang, X., Yang, G., Zhang, Y., Wang, H., & Li, J. (2022). Environmental and economic assessment of biogas and sludge energy utilization. *Energy*, 257, 124770. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124770>.

Received: Jun 14, 2025

Revised: Oct 4, 2025

Accepted: Oct 6, 2025

แอปพลิเคชันไลน์แชทบอทอัจฉริยะเพื่อช่วยจัดการแจ้งเตือนการทานยาสำหรับผู้สูงอายุ LINE SMART CHATBOT APPLICATION TO MANAGE NOTIFICATIONS TAKING MADICINE FOR THE ELDERLY

นันทวัน นาคอร่าม¹ วัฒนา เอกปมิตศิลป์^{1*} สิทธิศักดิ์ ทองสุข¹ ธเนศ เลิศจามีกร²

¹⁻³สาขาวิทยาการข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี

⁴คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

Nantawan Nakaram¹, Wattana Eakpamitsin¹, Sittisak Thongsuk¹ Thanet Lertjameekorn²

¹Data Science and Information Technology, Faculty of Science and Technology, Thonburi University

²Department of Computer, Faculty of Information Technology, Thepsatri Rajabhat University

nantawan_it@thonburi-u.ac.th, Wattana_it@thonburi-u.ac.th, sittisak@trums.thonburi-u.ac.th,

thanet.l@lawasri.tru.ac.th

*Corresponding Author, E-mail: wattana_it@thonburi-u.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาปัญหาและปัจจัยที่มีผลต่อการรับประทานยาอย่างถูกต้องของผู้สูงอายุตามหลัก 5R เพื่อออกแบบและแอปพลิเคชันไลน์แชทบอทอัจฉริยะเพื่อช่วยจัดการแจ้งเตือนการทานยาสำหรับผู้สูงอายุ และเพื่อ ประเมินประสิทธิภาพของระบบในการช่วยให้ผู้สูงอายุและผู้ดูแลสามารถจัดการการรับประทานยาได้อย่างถูกต้องและตรงเวลา กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ คือ ผู้สูงอายุจำนวน 30 คน ในชุมชน 4 แขวงหนองค้างพลู หนองแขม โดยการใช้การสุ่มแบบเจาะจง สถิติที่ใช้ คือ ค่าเฉลี่ย ค่าร้อยละ

ผลการวิจัยพบว่าระบบสามารถช่วยให้ผู้สูงอายุ และผู้ดูแลบริหารยาได้อย่างถูกต้องและสม่ำเสมอ ลดปัญหาการลืม ทานยา และเพิ่มคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุ นอกจากนี้ยังช่วยให้ผู้ดูแลสามารถตรวจสอบการบริหารยาได้ง่ายขึ้น ลดความ ข้ำซ้อนในกระบวนการบริหารยา และมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้กับกลุ่มผู้ป่วยอื่นๆ ที่ต้องการการบริหารยาอย่าง สม่ำเสมอ

คำสำคัญ: แชทบอทอัจฉริยะ, การแจ้งเตือนการทานยา, ผู้สูงอายุ

Abstract

This research aims to study the problems and factors affecting proper medication adherence among elderly patients according to the 5R principles, to design and develop an intelligent LINE chatbot application for medication reminder management for the elderly, and to evaluate the system's effectiveness in helping elderly patients and caregivers manage medication intake correctly and on time. The sample group consisted of 30 elderly individuals from 4 sub-districts in Nong Khaeng Plu, Nong Khaem, selected through purposive sampling. Statistical methods used included means and percentages.

The research findings revealed that the system can help elderly patients and caregivers manage medications correctly and consistently, reduce medication non-adherence problems, and improve the quality of life for elderly patients. Additionally, the system enables caregivers to monitor medication administration more easily, reduces redundancy in the medication management process, and has the potential for application with other patient groups requiring consistent medication management.

Keywords: Intelligent chatbot, Medication reminder, Elderly

บทนำ

ในปัจจุบันผู้สูงอายุของประเทศไทยเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงสภาพความเป็นอยู่และสภาพร่างกายมีความสำคัญในการดำเนินชีวิตเป็นอย่างมากในขณะนี้ซึ่ง คณะจัดทำรายงานสุขภาพคนไทย (2566) กล่าวว่า ในปี 2565 สัดส่วนผู้สูงอายุของไทยได้เพิ่มเป็นประมาณร้อยละ 20 ของประชากรทั้งหมด ทำให้สังคมไทยเป็น “สังคมสูงอายุอย่างสมบูรณ์” และในปี 2568 ผู้สูงอายุไทยจะเพิ่มเป็นร้อยละ 31.4 ของประชากรทั้งหมด การเข้าสู่สังคมสูงอายุได้ส่งผลกระทบในหลายๆ ด้าน โดยเฉพาะด้านสุขภาพ ที่เป็นนัยสำคัญต่อระบบการดูแลสุขภาพของประเทศ โดยปัญหาสุขภาพหลักของผู้สูงอายุมักจะเป็นภาวะที่เกิดจากโรคเรื้อรัง โรคเกี่ยวกับความผิดปกติของอวัยวะรับสัมผัส และโรคความผิดปกติทางระบบประสาท

จากปัญหาด้านสุขภาพของผู้สูงอายุ จึงต้องพัฒนาระบบบริการด้านสาธารณสุขอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ดังนั้นเป้าหมายในการลดปัญหาด้านสุขภาพของประเทศไทย คือ การมุ่งเน้นให้ประชากรสามารถช่วยเหลือดูแลตนเอง ในยามสูงวัยให้ได้นานที่สุด รวมไปถึง การดูแลและลดปัจจัยเสี่ยงทางสุขภาพก่อนเข้าสู่ผู้สูงอายุ การที่จะทำให้คนทุกวัยมีความสามารถในการดูแลตนเอง และได้รับการดูแลรักษาด้วยระบบบริการสุขภาพที่เชื่อมต่อกันอย่างมีประสิทธิภาพได้ จะต้องเตรียมความพร้อมด้วยการส่งเสริมสร้างแรงจูงใจด้วยนโยบายที่ส่งเสริมสุขภาพ หรือการใช้เทคโนโลยีมาช่วยในการยกระดับการเข้าถึงบริการด้านสุขภาพอย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อเริ่มเข้าสู่ผู้สูงอายุ พบว่าปัญหาสุขภาพก็มักเกิดตามมาทั้งการเจ็บป่วยที่บ่อยขึ้น รุนแรงมากขึ้น โรคประจำตัวมากขึ้น ทำให้หลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องมีความจำเป็นในการใช้ยาหลายขนาน จนหลายครั้งผู้สูงอายุบางรายมีความกังวลใจ และเสี่ยงที่ไม่ใช้ยาเหล่านั้น เนื่องจากเกรงว่ายาซึ่งเป็นสารเคมีอย่างหนึ่ง หากได้รับเข้าไปมากหรือเป็นเวลานาน จะเกิดอันตรายต่อร่างกายได้มากกว่าประโยชน์ที่จะเกิดขึ้น ศูนย์บริการทางการแพทย์ด้านการดูแลผู้สูงอายุ โรงพยาบาลนครธน กล่าวว่า ปัญหาในการกินยาเป็นประจำทุกวัน ส่งผลทำให้ผู้สูงอายุเสี่ยงต่อการหยิบบยาผิดส่วนหนึ่ง อาจจะเป็นเพราะความประมาทเลินเล่อ และอีกส่วนเกิดจากเหตุผลต่างๆ เช่น กินยาผิดจากปัญหาทางด้านสายตา ตาพร่ามัวมองอะไรไม่ชัดเจน หรือเป็นโรคที่เกี่ยวกับตา อาจทำให้การอ่านฉลากยาที่มีตัวหนังสือขนาดเล็ก จนเป็นเหตุให้หยิบบยาผิด ปัญหาการลืมกินยา กินยาไม่ตรงเวลา ปัญหาด้านความจำที่ถดถอย ผู้สูงอายุส่วนใหญ่จะมีปัญหาเรื่องความจำเสื่อมตามวัย หลงลืมได้ง่าย หรือจำไม่ได้เลยว่าต้องกินยา ทำให้มีโอกาสที่จะลืมกินยา กินยาไม่ตรงเวลา เมื่อลืมกินยาตามช่วงเวลาแพทย์สั่ง ผู้สูงอายุก็จะไปรวมกินเป็นมือเดียวกันในรอบมื้อถัดไปแทน ซึ่งเป็นการกินยาที่ผิดวิธี ผู้สูงอายุมักไม่กินยาตามแพทย์สั่ง หรือไม่ใช้ยาตามข้อมูลในฉลากยา ซึ่งพบทั้งกินยาเกินปริมาณ กินยาผิดเวลา หรือรวบเป็นมือเดียวกัน จะส่งผลต่อการออกฤทธิ์และประสิทธิภาพของยา ทำให้การรักษาโรคไม่ได้ผล และเป็นอันตรายต่อผู้สูงอายุ เป็นต้น

ผู้พัฒนาจึงมีแนวคิดในการพัฒนาแอปพลิเคชันไลน์แชทบอทอัจฉริยะเพื่อช่วยผู้สูงอายุในการกินยาอย่างสม่ำเสมอตามหลัก 5R โดยการแจ้งเตือนผู้ใช้ให้ทราบเวลาที่ควรกินยา ระบบนี้จะถูกออกแบบให้ใช้งานได้ง่ายและเหมาะสมสำหรับกลุ่ม

ผู้สูงอายุ โดยมีการตรวจสอบข้อมูลผู้ป่วย (Right Patient) ข้อมูลยา (Right Drug) ขนาดยา (Right Dose) วิธีการใช้ยา (Right Route) และเวลาในการรับประทานยา (Right Time) ผู้สูงอายุสามารถให้ผู้อื่นกรอกข้อมูลยาให้แทนในกรณีที่เป็นผู้ดูแลช่วยกรอกข้อมูลโดยที่ผู้สูงอายุไม่ต้องกรอกข้อมูลเอง และระบบจะเก็บประวัติการกินยา เพื่อให้ผู้สูงอายุหรือผู้ดูแลสามารถตรวจสอบได้อย่างถูกต้องและแก้ปัญหาต่างๆ เกี่ยวกับการกินยา ให้เหมาะสมมากขึ้น

การพัฒนาแอปพลิเคชันไลน์แชทบอทอัจฉริยะเพื่อช่วยจัดการแจ้งเตือนการทานยาสำหรับผู้สูงอายุ เริ่มจากการศึกษาพฤติกรรมและความต้องการของกลุ่มเป้าหมาย โดยผู้สูงอายุมักมีปัญหาเรื่องความจำ การใช้เทคโนโลยี และการจัดการยาหลายชนิด ดังนั้นการออกแบบต้องเน้นความเรียบง่าย ใช้งานง่าย และมีความน่าเชื่อถือสูง ระบบควรมีฟีเจอร์หลักที่ครอบคลุมการลงทะเบียนข้อมูลยา โดยให้ผู้ใช้หรือญาติสามารถบันทึกชื่อยา เวลาการทาน ขนาดของยา และคำแนะนำจากแพทย์ได้อย่างง่ายดาย โดยการถ่ายรูปปลากายาเพื่อลดความผิดพลาดในการกรอกข้อมูลการแจ้งเตือนต้องมีความยืดหยุ่นและปรับแต่งได้ตามความต้องการของแต่ละคน โดยระบบจะส่งข้อความแจ้งเตือนล่วงหน้า 15-30 นาที พร้อมทั้งมีการแจ้งเตือนซ้ำหากผู้ใช้ไม่ได้ยืนยันการทานยา

การออกแบบ User Interface ต้องคำนึงถึงการมองเห็นของผู้สูงอายุ โดยใช้ฟอนต์ขนาดใหญ่ สีที่ตัดกันชัด และปุ่มที่กดง่าย การใช้ภาษาที่เข้าใจง่าย หลีกเลี่ยงศัพท์เทคนิคที่ซับซ้อน ระบบการรายงานและติดตามเป็นสิ่งสำคัญ โดยควรมีฟีเจอร์สำหรับญาติหรือผู้ดูแลที่สามารถตรวจสอบสถานะการทานยาได้ รวมถึงการส่งรายงานสรุปรายสัปดาห์หรือรายเดือนให้แพทย์ เพื่อประกอบการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลต้องได้รับการคุ้มครองอย่างเข้มงวด โดยเฉพาะข้อมูลสุขภาพส่วนบุคคล ระบบควรมีการเข้ารหัสข้อมูลและการยืนยันตัวตนที่เหมาะสม การดำเนินการดังกล่าวจะช่วยให้ผู้สูงอายุมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นและลดความเสี่ยงจากการลืมทานยาหรือทานยาผิดเวลา

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัญหาและปัจจัยที่มีผลต่อการรับประทานยาอย่างถูกต้องของผู้สูงอายุตามหลัก 5R
2. เพื่อออกแบบและแอปพลิเคชันไลน์แชทบอทอัจฉริยะเพื่อช่วยจัดการแจ้งเตือนการทานยาสำหรับผู้สูงอายุ
3. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบในการช่วยให้ผู้สูงอายุและผู้ดูแลสามารถจัดการการรับประทานยาได้อย่างถูกต้องและตรงเวลา

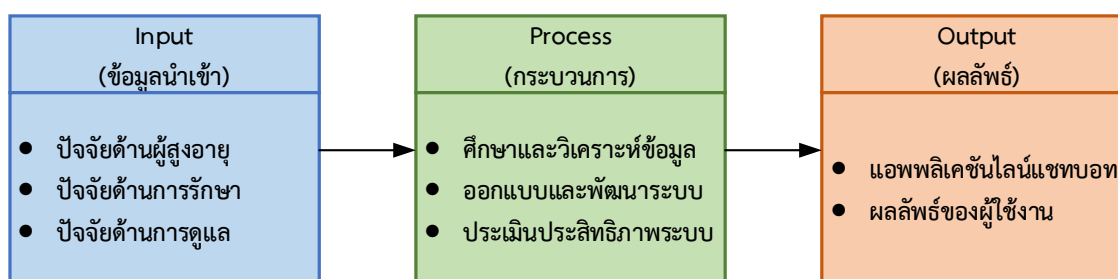
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยหลายเรื่อง พบว่า เครื่องมือและเทคโนโลยีดิจิทัลมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาแอปพลิเคชันด้านการดูแลสุขภาพ วนิชยา ยืนยง และคณะ (2565) ระบุว่า Android Studio และ Java เป็นเครื่องมือและภาษาที่นิยมใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันทั่วไป จุฑาตา สุวรรณธรา และอารีนา น้อยนงเยาว์ (2561) กล่าวถึงการใช้ QR Code เพื่อการนำเข้าข้อมูลอย่างรวดเร็วและแม่นยำ ชีรฉัตรย์ ปานกลาง และรัตนสุดา สุกदनัยสร (2567) ได้พัฒนากล่องยาอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถแจ้งเตือนการทานยาผ่านแอปพลิเคชัน Line ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ชุมพล โมฆรัตน์ กับดวงใจ หนูเล็ก (2567) ได้พัฒนา Chatbot ด้วย Machine Learning บนแพลตฟอร์ม Dialogflow เพื่อสนับสนุนข้อมูลผู้ใช้ นอกจากนี้ Al-Arkee et al. (2021) พบว่าแอปพลิเคชันสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เสริม เช่น Apple iWatch และเครื่องอ่านจากแผงยาอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้ติดตามสัญญาณชีพ และในส่วนของระบบยาอิเล็กทรอนิกส์ (EMS) Gates et al. (2021) อธิบายว่าเป็นระบบที่ช่วยสั่งจ่ายและบริหารยาโดยอาจมีระบบสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิก (CDS) ร่วมด้วย ขณะที่ Faisal et al. (2021) และ Adelia Susanti et al. (n.d.) กล่าวถึงการแทรกแซงผ่านแอปพลิเคชันมือถือหรือการแจ้งเตือนทาง

โทรศัพท์มือถือ เพื่อส่งเสริมการใช้ยาอย่างถูกต้องและต่อเนื่อง. สรุปงานวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าแอปพลิเคชันและระบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการแจ้งเตือนการรับประทานยาเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการส่งเสริมการดูแลสุขภาพตนเองของผู้ป่วย และได้รับผลตอบรับที่ดีจากผู้ใช้งาน

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าแอปพลิเคชันไลน์แชทบอทอัจฉริยะเพื่อช่วยจัดการแจ้งเตือนการทานยาสำหรับผู้สูงอายุ มีบทบาทสำคัญในการช่วยให้ผู้ป่วยปฏิบัติตามคำแนะนำในการใช้ยาได้ดีขึ้น รวมถึงเพิ่มความพึงพอใจในการใช้งานของผู้ป่วยและผู้ดูแลผู้สูงอายุ สรุปได้มาเป็นซึ่งกรอบแนวคิดของการวิจัยดังต่อไปนี้

กรอบแนวคิดของการวิจัย



ภาพที่ 1 แสดงกรอบแนวคิดของการวิจัย

ส่วน Input (ข้อมูลนำเข้า) ประกอบด้วย **ข้อมูลผู้สูงอายุ** เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการปรับแต่งระบบให้เหมาะสมกับผู้ใช้แต่ละคน ประกอบด้วยข้อมูลส่วนบุคคล เช่น อายุ น้ำหนัก ส่วนสูง ประวัติการแพทย์ โรคประจำตัว และข้อมูลผู้ติดต่อฉุกเฉิน รวมถึงข้อมูลเกี่ยวกับการมองเห็น การได้ยิน และความสามารถในการใช้สมาร์ทโฟนเพื่อปรับแต่งการแสดงผลและการแจ้งเตือนให้เหมาะสม **ข้อมูลด้านการรักษา** หมายถึงข้อมูลทางการแพทย์ที่ได้รับจากแพทย์หรือเจ้าหน้าที่ทางการแพทย์ ซึ่งรวมถึงใบสั่งยาจากแพทย์ รายละเอียดการวินิจฉัยโรค แผนการรักษา คำแนะนำพิเศษในการดูแลตนเอง และกำหนดการนัดหมายแพทย์ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการตั้งค่าระบบแจ้งเตือนและการให้คำแนะนำ **ข้อมูลการดูแล** คือข้อมูลรายละเอียดของยาแต่ละชนิดที่ผู้ป่วยต้องรับประทาน ประกอบด้วยชื่อยา ขนาดหรือความแรงของยา รูปร่างและสีของยา เวลาที่ต้องทานยา จำนวนครั้งต่อวัน ระยะเวลาในการรักษา คำแนะนำในการเก็บรักษา ยา ข้อควรระวังในการทานยา และข้อมูลเกี่ยวกับผลข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้น

ส่วน Process (กระบวนการ) ประกอบด้วย **ขั้นตอนการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรม** เป็นกระบวนการที่ระบบ จะเรียนรู้และวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการทานยาของผู้ใช้แต่ละคน โดยติดตามเวลาที่ผู้ใช้ยืนยันการทานยา ความถี่ในการลืมทานยา ช่วงเวลาที่มักจะลืม และปัจจัยแวดล้อมที่อาจส่งผลต่อการทานยา เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้มาปรับแต่งการแจ้งเตือนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น **ขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาระบบ** คือกระบวนการสร้างแอปพลิเคชันโดยเริ่มจากการออกแบบ User Interface ที่เหมาะสมกับผู้สูงอายุ การพัฒนาระบบฐานข้อมูลสำหรับเก็บข้อมูลยาและการแจ้งเตือน การพัฒนา API สำหรับเชื่อมต่อกับ LINE Platform และการสร้างระบบความปลอดภัยของข้อมูล และ **ขั้นตอนการประเมินประสิทธิภาพระบบ** เป็นกระบวนการทดสอบและประเมินผลการทำงานของระบบในด้านต่างๆ ได้แก่ ความแม่นยำของการแจ้งเตือน ความเร็วในการตอบสนอง ความพึงพอใจของผู้ใช้ และประสิทธิภาพในการลดการลืมทานยา โดยใช้วิธีการทดสอบหลายรูปแบบ เช่น การทดสอบกับกลุ่มตัวอย่าง การเก็บข้อมูล Feedback และการวิเคราะห์สถิติการใช้งาน

ส่วน Output (ผลลัพธ์) ประกอบด้วย **แอปพลิเคชันเพื่อใช้ในการทานยา** เป็นผลลัพธ์หลักที่ได้จากการพัฒนา ซึ่งเป็นแชทบอทบน LINE ที่มีฟีเจอร์ครบครัน ประกอบด้วยระบบแจ้งเตือนการทานยา ระบบบันทึกการทานยา การแสดงรายการยาและเวลาที่ต้องทาน

การให้ข้อมูลเกี่ยวกับยา การแจ้งเตือนยาใกล้หมด และระบบรายงานสำหรับญาติหรือแพทย์ และ **ผลการประเมินผู้ใช้งาน** คือข้อมูลที่ได้จากการประเมินประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน ซึ่งรวมถึงผลการศึกษาวิจัยเรื่องการลดลงของอัตราการล้มตายนยา ระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ความแม่นยำของระบบแจ้งเตือน และข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อยอด

ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นการพิสูจน์ว่าเทคโนโลยีแชทบอทสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูแลสุขภาพของผู้สูงอายุได้อย่างมีนัยสำคัญ และสามารถนำไปต่อยอดหรือขยายผลไปสู่การใช้งานในวงกว้างได้ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาแอปพลิเคชันไลน์แชทบอทอัจฉริยะเพื่อช่วยจัดการแจ้งเตือนการทานยาสำหรับผู้สูงอายุโดยใช้แพลตฟอร์ม LINE Official Account และ Messaging API เพื่อสร้างระบบแชทบอทที่สามารถแจ้งเตือนผู้ใช้ให้ทราบเวลาที่ควรบริโภทยา ระบบถูกออกแบบให้ใช้งานง่ายและเหมาะสมสำหรับกลุ่มผู้สูงอายุ โดยมีฟีเจอร์ต่างๆ เช่น การแจ้งเตือนเวลาการกินยา การดูข้อมูลและรายละเอียดยา การเพิ่มและแก้ไขรายการยา และการดูประวัติการกินยา ซึ่งผู้สูงอายุสามารถให้ผู้อื่นกรอกข้อมูลยาแทนได้ และได้มีกลุ่มตัวอย่างการทำงานวิจัยโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร คือ ผู้สูงอายุ ญาติผู้สูงอายุ ในชุมชน 4 แขวงหนองค้างพลู หนองแขม มีสมาชิกทั้งหมด จำนวน 160 คน

กลุ่มตัวอย่าง คือ ผู้สูงอายุ ญาติ โดยใช้วิธีการสุ่ม เลือกแบบเจาะจง ผู้ใช้งานแอปพลิเคชันไลน์แชทบอทอัจฉริยะเพื่อช่วยจัดการแจ้งเตือนการทานยา จากกลุ่มชุมชน 4 แขวงหนองค้างพลู หนองแขม จำนวน 30 คน

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. ผลการประเมินความเหมาะสมการทำงานของระบบแอปพลิเคชันไลน์แชทบอทอัจฉริยะแจ้งเตือนการทานยาสำหรับผู้สูงอายุ จากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 ด้าน

2. แบบประเมินคุณภาพแอปพลิเคชันไลน์แชทบอทอัจฉริยะเพื่อช่วยจัดการแจ้งเตือนการทานยาสำหรับผู้สูงอายุ จากผู้สูงอายุในการใช้งาน จำนวน 5 ด้าน

ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย

1. ตัวแปรต้น คือ ข้อมูลนำเข้า เช่น ปัญหาการทานยาของผู้สูงอายุ ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีคำสั่งของแพทย์และตารางมุลยา พฤติกรรมการใช้ยา ข้อจำกัดทางร่างกาย และกระบวนการพัฒนา เช่น วิเคราะห์ปัญหาความต้องการ ออกแบบระบบกินยา พัฒนาระบบการแจ้งเตือน ทดสอบปรับปรุง ประเมินการใช้งานระบบ

2. ตัวแปรตาม คือ ผลลัพธ์ที่ได้ เช่น ระบบการทานยาของผู้สูงอายุ การทานยาตรงตามเวลา ญาติตรวจสอบได้ง่าย ลดความผิดพลาดในการทานยา ปรับปรุงคุณภาพชีวิตระบบติดตามอัตโนมัติ

ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาออกแบบอุปกรณ์แอปพลิเคชันไลน์แชทบอทอัจฉริยะแจ้งเตือนการทานยา
2. นำข้อมูลมาวิเคราะห์และวางแผนพัฒนาระบบแจ้งเตือนผู้สูงอายุ
3. ออกแบบแอปพลิเคชันไลน์แชทบอทอัจฉริยะแจ้งเตือนการทานยา

ขั้นตอนหลังการผลิต

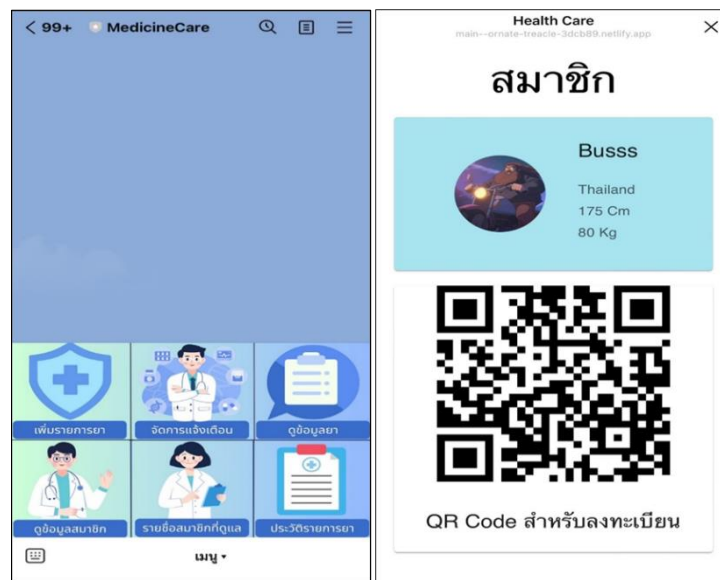
1. นำเสนอวิธีการทำงานของระบบแอปพลิเคชันไลน์แชทบอทอัจฉริยะแจ้งเตือนการทานยาสำหรับผู้สูงอายุ ให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน ทำการทดสอบระบบเพื่อหาข้อผิดพลาด และสิ่งที่ต้องแก้ไขเพิ่มเติมตามคำแนะนำ สรุปผลได้ดังนี้ตารางที่ 1 ดังนี้ ตารางที่ 1 ผลการประเมินความเหมาะสมการทำงานของระบบ

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	ระดับ
การจัดการข้อมูลผู้สูงอายุ			
1. ด้านการวิเคราะห์และออกแบบ	4.11	0.41	มาก
2. ด้านการออกแบบฐานข้อมูล	4.16	0.20	มาก
3. ด้านการออกแบบซอฟต์แวร์/ฮาร์ดแวร์	4.32	0.34	มาก
ประเมินผลรวมทั้งหมด	4.19	0.31	มาก

จากตารางที่ 1 สรุปผลการประเมินความเหมาะสมการทำงานของระบบทั้ง 3 ด้าน โดยผู้เชี่ยวชาญ พบว่า การประเมินคุณภาพระบบโดยภาพรวมอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.19$ S.D. = 0.31) ด้านที่ผู้เชี่ยวชาญประเมินความเหมาะสมของระบบมากที่สุด ได้แก่ ด้านการออกแบบซอฟต์แวร์ / ฮาร์ดแวร์ ($\bar{X} = 4.34$ S.D. = 0.34) รองลงมา ด้านการออกแบบฐานข้อมูล ($\bar{X} = 4.16$ S.D. = 0.20) และด้านการวิเคราะห์และออกแบบระบบ ($\bar{X} = 4.11$ S.D. = 0.41) ตามลำดับ

ผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ และออกแบบระบบแอปพลิเคชันไลน์แชทบอทอัจฉริยะแจ้งเตือนการทานยาที่มีดังนี้
การออกแบบหน้าจอ (Screen Design)



ภาพที่ 2 แสดงหน้าจอแสดงเมนูหลักของระบบ/QR Code สำหรับลงทะเบียน

The image displays two mobile application screens for a 'Health Care' app. The left screen is titled 'เพิ่มข้อมูลยา' (Add Medication) and contains fields for 'ชื่อยา*' (Medicine Name) with the value 'พารา' (Paracetamol), a dropdown for 'วันที่รับประทานยา' (Date of Medication) with the value 'อา, จ, อ, พ, พอ, ศ, ส', a checked checkbox for 'กินทุกวัน' (Take every day), a 'ช่วงเวลาที่ยกิน' (Time of intake) section with buttons for 'เช้า' (Morning), 'กลางวัน' (Afternoon), 'เย็น' (Evening), and 'ก่อนนอน' (Before bed), a 'ก่อนหรือหลังอาหาร' (Before or after meal) section with buttons for 'ก่อนอาหาร' (Before meal) and 'หลังอาหาร' (After meal), and a 'กินครั้งละ' (Take how many times) section with buttons for '1 เม็ด' (1 tablet) and 'ครึ่งเม็ด' (Half tablet). A red note at the bottom states '*ถ้าเลือกครึ่งเม็ด ยาจจะถูก x2'. The right screen is titled 'เพิ่มรูปภาพยา' (Add Medication Image) and shows a 'MedicinetCare' image, a dropdown for 'ผู้ป่วยที่ต้องการบันทึก' (Patient to be recorded) with the value 'Busss', and a blue 'ยืนยัน' (Confirm) button at the bottom.

ภาพที่ 3 แสดงหน้าจอแสดงการเพิ่มรายการยา

The image displays two mobile application screens for a 'Health Care' app. The left screen is titled 'ข้อมูลรายการยา' (Medication Information) and shows a 'MedicinetCare' image, the name 'พารา' (Paracetamol), the instruction 'กินก่อนอาหาร' (Take before meal), and the quantity 'คงเหลือ 20 เม็ด' (Remaining 20 tablets). It also shows the frequency 'วันที่รับประทานยา : กินทุกวัน' (Date of medication: Take every day) with checked checkboxes for 'เช้า' (Morning), 'กลางวัน' (Afternoon), 'เย็น' (Evening), and 'ก่อนนอน' (Before bed). The right screen is titled 'ประวัติการแก้ไขยา พารา' (Medication History) and shows two entries. Each entry includes a 'MedicinetCare' image, the name 'พารา' (Paracetamol), the instruction 'กินก่อนอาหาร' (Take before meal), and the quantity 'คงเหลือ 20 เม็ด' (Remaining 20 tablets). It also shows the frequency 'วันที่รับประทานยา : กินทุกวัน' (Date of medication: Take every day) with checked checkboxes for 'เช้า' (Morning), 'กลางวัน' (Afternoon), 'เย็น' (Evening), and 'ก่อนนอน' (Before bed). The entries are dated '1/6/2567' and include a time stamp.

ภาพที่ 4 แสดงหน้าจอแสดงข้อมูลที่เพิ่ม/ประวัติการแก้ไขรายการยา

The image displays two side-by-side screenshots of a mobile application titled "Health Care".

Left Screenshot (Add Medicine):

- Header: Health Care, main--ornate-treacle-3dcb89.netlify.app
- Section: **เพิ่มข้อมูลยา** (Add Medicine)
- Form fields:
 - ชื่อยา* (Medicine Name): พารา (Paracetamol)
 - วันที่รับประทานยา (Date of intake): Dropdown menu with options: อา, จ, อ, พ, พฤ, ศ, ส
 - ☒ กินทุกวัน (Take every day)
 - ช่วงเวลาที่ยกิน (Time of intake): Buttons for เช้า (Morning), กลางวัน (Afternoon), เย็น (Evening), ก่อนนอน (Before bed)
 - ก่อนหรือหลังอาหาร (Before or after meal): Buttons for ก่อนอาหาร (Before meal), หลังอาหาร (After meal)
 - กินครั้งละ (Take each time): 1 เม็ด (1 tablet)
- Footer: *ถ้าเลือกครั้งเม็ด ยาจจะถูก x2

Right Screenshot (Add Medicine Image):

- Header: Health Care
- Form fields:
 - 1 เม็ด (1 tablet) and ครั้งเม็ด (Per tablet)
 - *ถ้าเลือกครั้งเม็ด ยาจจะถูก x2
 - จำนวนยา (Number of medicine): 10 เม็ด (10 tablets)
 - Section: **เพิ่มรูปภาพยา** (Add medicine image)
 - Image placeholder: A small image of a medicine box with text "MedicineCare" and "3-5-2567".
 - อัปโหลดรูปภาพ (Upload image)
 - ผู้ป่วยที่ต้องการบันทึก (Patient to be recorded): Busss
 - Button: ยืนยัน (Confirm)

ภาพที่ 5 แสดงหน้าจอแสดงการแก้ไขรายการยา

The image displays two side-by-side screenshots of a mobile application titled "Health Care".

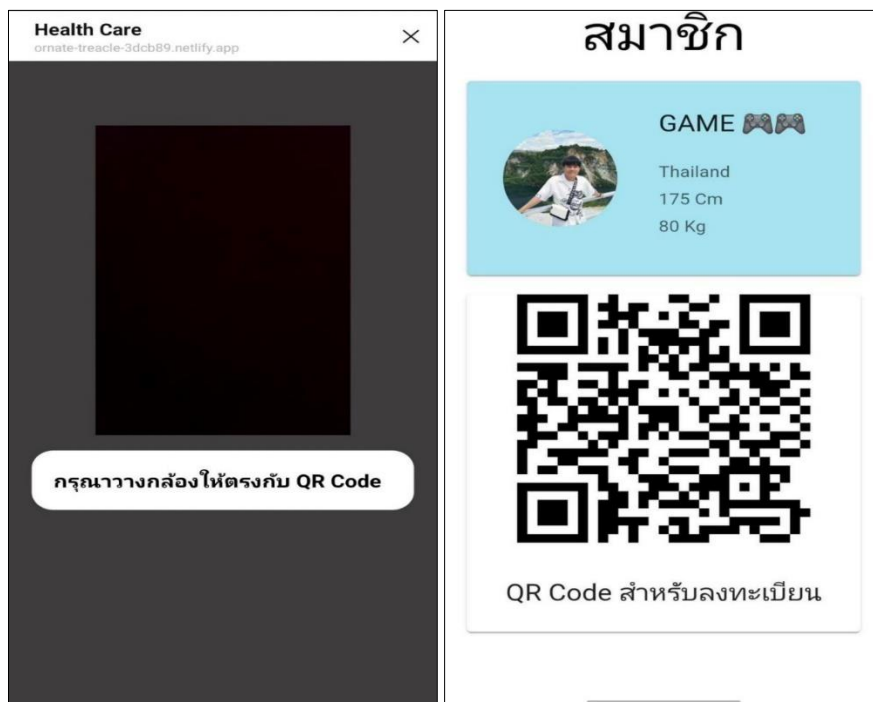
Left Screenshot (Medicine List):

- Header: Health Care, main--ornate-treacle-3dcb89.netlify.app
- Section: **ข้อมูลรายการยา** (Medicine List)
- Medicine Card:
 - ชื่อยา: พารา (Paracetamol)
 - กินก่อนอาหาร (Take before meal)
 - คงเหลือ 20 เม็ด (Remaining 20 tablets)
 - วันที่รับประทานยา : กินทุกวัน (Date of intake : Take every day)
 - Checkmarks:
 - ☒ เช้า (Morning)
 - ☒ กลางวัน (Afternoon)
 - ☒ เย็น (Evening)
 - ☒ ก่อนนอน (Before bed)

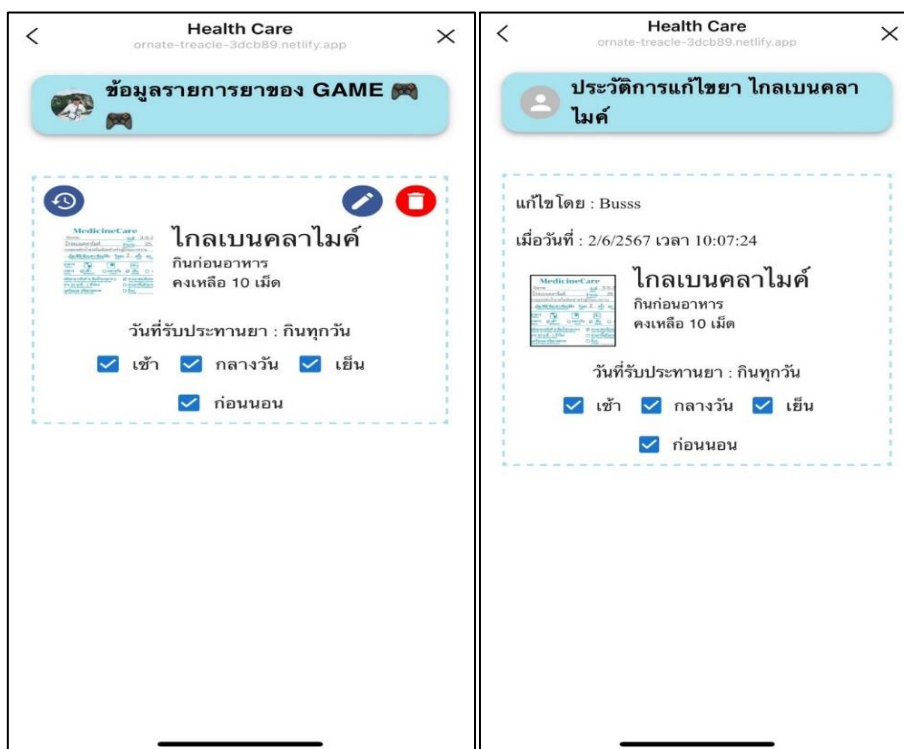
Right Screenshot (Confirm Deletion):

- Header: Health Care, main--ornate-treacle-3dcb89.netlify.app
- Text: ต้องการลบ พารา ใช่หรือไม่ (Do you want to delete Paracetamol? Yes or No)
- Buttons: ใช่ (Yes), ไม่ (No)

ภาพที่ 6 แสดงหน้าจอแสดงการลบยา



ภาพที่ 7 แสดงหน้าจอแสดงการเพิ่มผู้สูงวัย



ภาพที่ 8 แสดงหน้าจอแสดงประวัติการแก้ไขการจัดยาให้ผู้สูงวัย

The image shows two screenshots of the 'Health Care' app interface. The left screenshot is the 'Add Medication' screen, featuring a 'เพิ่มข้อมูลยา' (Add Medication) button, a text input for 'ชื่อยา*' (Medicine Name*) with 'ไกลเบนคลาไมด์' (Glibenclamide) entered, a dropdown for 'วันที่รับประทานยา' (Medication Date) with 'อา, จ, อ, พ, พณ, ศ, ส' (Sun, Mon, Tue, Wed, Thu, Fri, Sat) selected, a checked 'กินทุกวัน' (Take every day) option, a 'ช่วงเวลาที่ยกิน' (Time to take) section with buttons for 'เช้า' (Morning), 'กลางวัน' (Midday), 'เย็น' (Evening), and 'ก่อนนอน' (Before bed), a 'ก่อนหรือหลังอาหาร' (Before or after meal) section with 'ก่อนอาหาร' (Before meal) selected, a 'กินครั้งละ' (Take how many times) section with '1 เม็ด' (1 pill) selected, and a note '*ถ้าเลือกครั้งเม็ด ยาจจะถูก x2' (If you select the number of pills, it will be multiplied by 2). The right screenshot is the 'Medication Details' screen, showing 'ก่อนหรือหลังอาหาร' (Before or after meal) with 'ก่อนอาหาร' (Before meal) selected, 'กินครั้งละ' (Take how many times) with '1 เม็ด' (1 pill) selected, 'จำนวนยา' (Number of pills) with '10' entered, and a 'เพิ่มรูปภาพยา' (Add medication image) section with a placeholder image and an 'อัปโหลดรูปภาพ' (Upload image) button. Both screens have a 'ยืนยัน' (Confirm) button at the bottom.

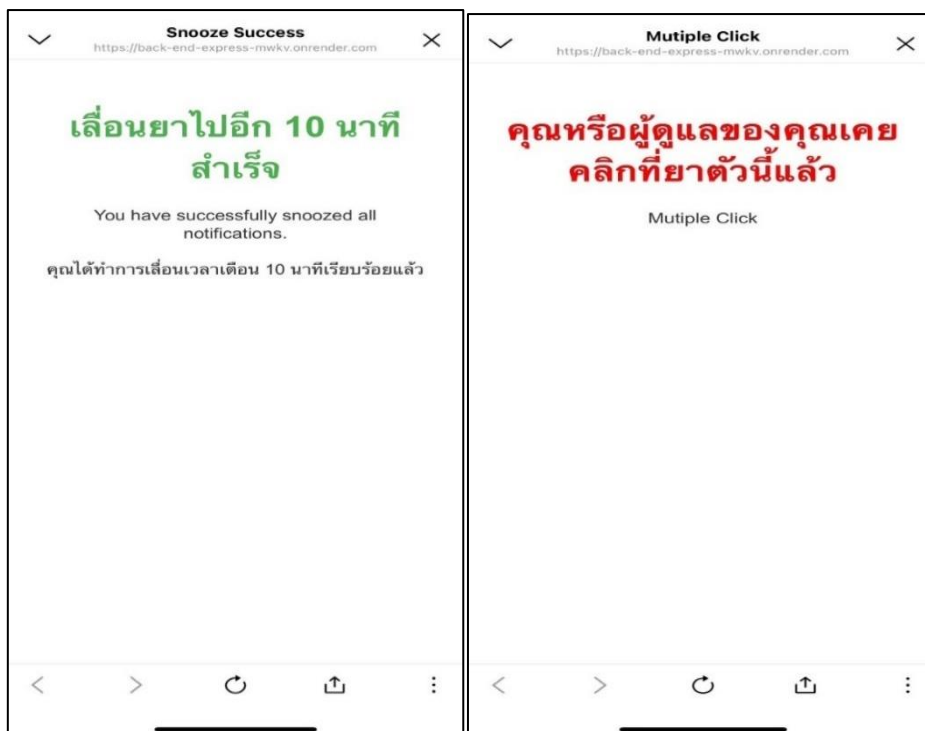
ภาพที่ 9 แสดงหน้าจอแสดงการแก้ไขการจัดยาให้ผู้สูงวัย

The image shows two screenshots of the 'Health Care' app interface. The left screenshot is the 'Medication Schedule' screen, featuring a 'ดูข้อมูลสมาชิกที่ดูแล' (View patient information) button, a 'GAME' section with a game icon and four sub-icons (pencil, bell, clock, trash), and a blue circular button with a white plus sign at the bottom right. The right screenshot is the 'Medication Schedule Details' screen, titled 'ตั้งค่าการแจ้งเตือนของ GAME' (Set GAME notification), showing a list of times with buttons for 'เช้า' (Morning), 'กลางวัน' (Midday), 'เย็น' (Evening), and 'ก่อนนอน' (Before bed), each with a corresponding time and an edit icon: '09 : 30', '13 : 47', '18 : 52', and '23 : 36'.

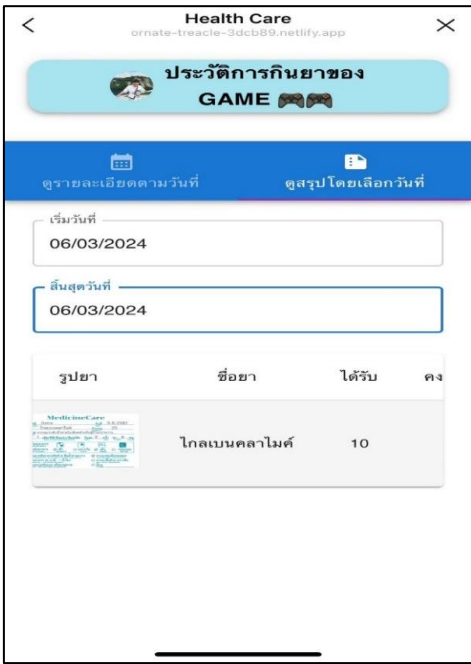
ภาพที่ 10 แสดงหน้าจอแสดงการตั้งค่าการแจ้งเตือน



ภาพที่ 11 แสดงหน้าจอแสดงการกดยอมรับการทานยา



ภาพที่ 12 แสดงหน้าจอแสดงการเลื่อนยา/การกดยับยาดั้วนี้แล้ว



รูปยา	ชื่อยา	ได้รับ	คงเหลือ
	ไกลเบนคลาไมด์	10	9

ภาพที่ 13 แสดงหน้าจอแสดงสรุปรายการยาโดยเลือกวันที่

หลังจากที่พัฒนาเรียบร้อยแล้ว ได้มีการนำไปทดลองใช้ระบบ โดยเลือกกลุ่มตัวอย่างในการใช้ระบบซึ่งเป็นผู้ที่มีความต้องการใช้งานระบบแจ้งเตือนผู้สูงอายุด้วยระบบแอปพลิเคชันไลน์แชนแนลของโรงพยาบาลผู้สูงอายุ โดยใช้การเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จำนวน 40 คน สามารถนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพื้นฐาน ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แล้วนำค่าเฉลี่ยเปรียบเทียบกับเกณฑ์การแปลความหมาย สรุปผลได้ดังตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 ผลแบบประเมินคุณภาพแอปพลิเคชันไลน์แชนแนลของโรงพยาบาลผู้สูงอายุเพื่อช่วยจัดการแจ้งเตือนการทานยาสำหรับผู้สูงอายุ

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	ระดับ
การจัดการข้อมูลผู้สูงวัย			
1. ระบบสามารถเพิ่ม ลบ แก้ไขข้อมูลผู้สูงวัยได้สะดวก	4.16	0.72	มาก
2. ระบบสามารถแสดงรายละเอียดของผู้สูงวัยแต่ละคนได้ครบถ้วน	4.12	0.71	มาก
3. การค้นหาข้อมูลผู้สูงวัยมีความรวดเร็วและแม่นยำ	4.02	0.90	มาก
ประเมินผลรวม	4.10	0.77	มาก
การจัดการข้อมูลยา			
4. ระบบสามารถบันทึกข้อมูลยาได้อย่างครบถ้วน (ชื่อยา, ขนาดยา, เวลา)	4.29	0.63	มาก

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	ระดับ
5. ระบบรองรับการแก้ไข/ลบข้อมูลได้อย่างสะดวก	4.9	0.59	มาก
6. ระบบมีอินเทอร์เฟซที่ชัดเจนและเข้าใจง่ายในการจัดการข้อมูลยา	4.16	0.57	มาก
ประเมินผลรวม	4.45	0.59	มาก

การกำหนดยาให้กับผู้สูงวัย			
7. ระบบสามารถเชื่อมโยงข้อมูลยาเข้ากับผู้สูงวัยแต่ละคนได้อย่างแม่นยำ	4.22	0.71	มาก
8. ระบบรองรับการตั้งค่าการให้ยาในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างยืดหยุ่น	4.11	0.76	มาก
9. ระบบช่วยลดความผิดพลาดในการให้ยาผิดให้กับผู้สูงวัย	4.15	0.72	มาก
ประเมินผลรวม	4.16	0.73	มาก
การแจ้งเตือนการบริหารการทานยา			
10. ระบบสามารถแจ้งเตือนการทานยาได้ตรงเวลา	4.13	0.72	มาก
11. ระบบสามารถตั้งค่าการแจ้งเตือนได้หลากหลายช่องทาง (เช่น เสียง, แจ้งเตือนบนแอป)	4.15	0.72	มาก
12. การแจ้งเตือนของระบบสามารถช่วยให้ผู้ดูแลการบริหารการให้ยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ	4.17	0.57	มาก
ประเมินผลรวม	4.15	0.67	มาก
การรายงานประวัติการทานยาของผู้สูงวัย			
13. ระบบสามารถแสดงรายงานประวัติการทานยาได้ตามช่วงเวลาที่กำหนด	4.22	0.71	มาก
14. รายงานมีความละเอียดและเข้าใจง่าย	4.30	0.63	มาก
15. ระบบช่วยให้ผู้ดูแลสามารถติดตามและวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการทานยาของผู้สูงวัยได้ดีขึ้น	4.12	0.71	มาก
ประเมินผลรวม	4.21	0.68	มาก
ประเมินผลรวมทั้งหมด	4.21	0.68	มาก

จากตารางที่ 2 สรุปผลการประเมินคุณภาพทั้งหมด 5 ด้าน พบว่า การประเมินคุณภาพระบบโดยภาพรวมอยู่ในระดับมาก มาก ($\bar{X} = 4.21$ S.D. = 0.68) ด้านค่าเฉลี่ยมากที่สุด คือ ด้านการจัดข้อมูลยา ($\bar{X} = 4.54$ S.D. = 0.59) รองลงมา ด้านการรายงานประวัติการทานยาของผู้สูงวัย ($\bar{X} = 4.21$ S.D. = 0.68) รองลงมา ด้านการกำหนดยาให้กับผู้สูงวัย ($\bar{X} = 4.16$ S.D. = 0.73) รองลงมา ด้านการแจ้งเตือนการบริหารการทานยา ($\bar{X} = 4.15$ S.D. = 0.67) และด้านการจัดการข้อมูลผู้สูงวัย ($\bar{X} = 4.10$ S.D. = 0.77) ตามลำดับ

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

การวิเคราะห์ปัญหาพบว่าผู้รับยามักลืมบริหารยา ซึ่งส่งผลต่อการรักษาและสุขภาพโดยรวมของพวกเขา วัตถุประสงค์หลักคือการพัฒนาระบบที่สามารถลดปัญหาการลืมบริหารยา เพิ่มความสะดวกในการใช้งาน เก็บประวัติการบริหารยา และช่วยในการติดตามและตรวจสอบการบริหารยา

ขั้นแรกในการดำเนินการคือการออกแบบระบบแจ้งเตือนการบริหารยาที่สามารถแจ้งเตือนผู้ใช้ตามเวลาที่กำหนดผ่านแอปพลิเคชันหรืออุปกรณ์พกพา ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้ไม่ลืมทานยาปรับแต่งให้ใช้งานง่าย โดยเฉพาะสำหรับผู้สูงอายุ อินเทอร์เน็ตถูกออกแบบให้มีปุ่มใหญ่และเมนูที่เรียบง่าย เพื่อให้ผู้สูงอายุสามารถใช้งานได้โดยไม่ยุ่งยาก และยังสามารถให้ผู้อื่น เช่น ผู้ดูแล ช่วยกรอกข้อมูลยาแทนได้ในกรณีที่จำเป็น

นอกจากนี้ ระบบยังมีฟังก์ชันในการเก็บประวัติการบริหารยา โดยข้อมูลจะถูกบันทึกในฐานข้อมูล ผู้ใช้หรือผู้ดูแลสามารถเข้าถึงและตรวจสอบประวัติการบริหารยาได้ตลอดเวลา ซึ่งช่วยให้ผู้ดูแลสามารถติดตามและตรวจสอบการบริหารยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดความกังวลเกี่ยวกับการลืมบริหารยา

ผลวิจัย พบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การแจ้งเตือนทำงานได้ตามเวลาที่กำหนด ลดปัญหาการลืมบริหารยาได้จริง ผู้ใช้โดยเฉพาะผู้สูงอายุสามารถใช้งานระบบได้อย่างสะดวก การเก็บข้อมูลและการเข้าถึงประวัติการบริหารยาทำได้มีประสิทธิภาพ ผู้ดูแลสามารถติดตามและตรวจสอบการบริหารยาได้อย่างใกล้ชิด ผลที่ได้คือระบบช่วยเพิ่มคุณภาพชีวิตและการดูแลสุขภาพของผู้ป่วยและผู้สูงอายุได้อย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ฅนอม กองใจ และอริษา ทาทอง (2565) พบว่า ผลการศึกษาความพึงพอใจจากผู้ใช้ระบบมีรายละเอียดดังนี้ ความพึงพอใจด้านประสิทธิภาพการแจ้งเตือนในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.84$, S.D = 0.37) ด้านความครบถ้วนของข้อมูลที่ส่งแจ้งเตือนในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.40$, S.D = 0.71) ด้านความสะดวกในการใช้งานในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.72$, S.D = 0.46) ด้านความถูกต้องของข้อมูลในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.68$, S.D = 0.56) ด้านความพึงพอใจโดยรวมในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.76$, S.D = 0.44) และผลคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.68$, S.D = 0.50)

องค์ความรู้ใหม่

จากการวิจัยและพัฒนา Line Chatbot อัจฉริยะเพื่อช่วยจัดการแจ้งเตือนการทานยาสำหรับผู้สูงอายุ พบว่าเทคโนโลยี Chatbot สามารถเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการส่งเสริมการดูแลสุขภาพผู้สูงอายุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการแจ้งเตือนและติดตามการทานยา ด้วยคุณสมบัติที่สามารถตั้งเวลาการแจ้งเตือนที่ยืดหยุ่น, รองรับการปรับเปลี่ยนข้อมูลยาได้ง่าย, และมีการโต้ตอบที่เป็นมิตรผ่านแพลตฟอร์มที่ผู้สูงอายุคุ้นเคยอย่าง Line ทำให้ผู้สูงอายุสามารถจัดการการทานยาได้อย่างถูกต้องและสม่ำเสมอ ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น และลดความเสี่ยงจากการทานยาผิดพลาดหรือไม่ครบถ้วน นอกจากนี้ การใช้ Chatbot ยังช่วยลดภาระของบุคลากรทางการแพทย์หรือผู้ดูแลในการติดตามและแจ้งเตือนการทานยาได้อีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. การบริหารจัดการส่วนบุคคลระบบสามารถช่วยบริหารกิจวัตรประจำวัน เช่น การจัดการเวลา การออกกำลังกาย โภชนาการ การเงินส่วนบุคคล และการเรียนรู้ ทำให้การดำเนินชีวิตเป็นระบบและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
2. การจัดการโครงการและกิจกรรมเฉพาะทางระบบมีความยืดหยุ่นสูง สามารถใช้ติดตามและจัดการงานที่ซับซ้อน เช่น งานอาสาสมัครหรือโครงการในองค์กร ช่วยลดความผิดพลาดและเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน
3. การดูแลเฉพาะด้านและชีวิตประจำวันระบบสามารถตั้งค่าแจ้งเตือนและติดตามกิจกรรมที่ต้องทำเป็นประจำ เช่น การดูแลสุขภาพ ช่วยเพิ่มความสะดวก ลดความกังวล และทำให้ชีวิตมีระเบียบมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Adelia Susanti, I., Efendi, F., Putro Pramono, A., & Nashiruddin Habibie, A. (2020). The effectiveness of interventions using electronic reminders to improve adherence to hypertension medication: A systematic review. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*, 24. <https://www.researchgate.net/publication/341568301>
- Al-Arkee, S., Mason, J., Lane, D. A., Fabritz, L., Chua, W., Haque, M. S., & Jalal, Z. (2021). Mobile apps to improve medication adherence in cardiovascular disease: Systematic review and meta-analysis. *Journal of Medical Internet Research*, 23(5). <https://doi.org/10.2196/24190>
- Faisal, S., Ivo, J., & Patel, T. (2021). A review of features and characteristics of smart medication adherence products. *Canadian Pharmacists Journal*, 154(5), 312–323. <https://doi.org/10.1177/17151635211034198>
- Gates, P. J., Hardie, R. A., Raban, M. Z., Li, L., & Westbrook, J. I. (2021). How effective are electronic medication systems in reducing medication error rates and associated harm among hospital inpatients? A systematic review and meta-analysis. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 28(1), 167–176. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocaa230>
- จุฑาตา สุวรรณธารา และ อาริษา น้อยนงเยาว์. (2561). แอปพลิเคชันแจ้งเตือนการบริหารยา. http://www.it.kmitl.ac.th/~sirion/senior_project/wiseMed/5880188166-doc2.pdf
- ถนนม กองใจ และ อริษา ทาทอง. (2565). การพัฒนาระบบแจ้งเตือนกิจกรรมและการนัดหมายอัตโนมัติผ่านแอปพลิเคชันไลน์. *Mahidol R2R e-Journal*, 9(2), 33-45. <http://doi.org/10.14456/jmu.2022.14>
- วณิชยา ยืนยง และคณะ. (2565). แอปพลิเคชันแจ้งเตือนรับประทานยา. https://re.kbu.ac.th/pdf_read.php?p_id=F56ED2CE-0F40-412C-8D78-F974BAE3A64E&type=abs

Translated Thai References

- SUWANTHARA, J., & NOINONGYAO, A. (2018). Medication Reminder Application. http://www.it.kmitl.ac.th/~sirion/senior_project/wiseMed/5880188166-doc2.pdf
- Kongjai, T. & Thathong, A. (2022). Development of a notification system for automatic events and appointments through the LINE application. *Mahidol R2R e-Journal*, 9(2), 33-45. <http://doi.org/10.14456/jmu.2022.14>
- Yuenyong, V. et al. (2022). Application for medication reminders. https://re.kbu.ac.th/pdf_read.php?p_id=F56ED2CE-0F40-412C-8D78-F974BAE3A64E&type=abs

Received: Feb 24, 2025

Revised: Jun 22, 2025

Accepted: Dec 5, 2025

การประยุกต์ใช้วิธี FSN Analysis เพื่อช่วยในการจัดการคลังม้วนกระดาษเกิดประสิทธิภาพ กรณีศึกษา บริษัทการผลิตบรรจุภัณฑ์กระดาษลูกฟูกในกรุงเทพมหานคร

APPLYING OF FSN ANALYSIS TO EFFICIENT PAPER ROLL WAREHOUSE MANAGEMENT: A CASE STUDY OF CORRUGATED PAPER PACKAGING COMPANY, BANGKOK

เจษฎา มณีโยย^{1*} ฉัตรชัย เหล่าเขตการณ²¹หลักสูตรบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธนบุรี²คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยธนบุรีJetsada Maneeyoi¹ Chatchai Laoketkarn²¹Master of Business Administration, Thonburi University²Faculty of Business Administration, Thonburi University

*Corresponding Author, E-mail: jetsadamaneeoyoi@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัญหาและสาเหตุของกระบวนการจัดการคลังม้วนกระดาษ และเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการจัดการคลังของบริษัทผลิตบรรจุภัณฑ์กระดาษลูกฟูกในกรุงเทพมหานคร โดยประยุกต์ใช้วิธีวิเคราะห์เอฟเอสเอ็น (FSN Analysis) เพื่อจำแนกวัสดุตามความถี่ในการใช้งาน และกำหนดพื้นที่จัดเก็บที่เหมาะสมกับลักษณะการเคลื่อนไหวของวัสดุ เพื่อให้การเบิกจ่ายและจัดเก็บมีความรวดเร็วและเป็นระบบมากขึ้น พร้อมทั้งวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แผนภูมิแก๊งปลา (Fishbone Diagram) เพื่อตรวจสอบสาเหตุของปัญหา รวมถึงการออกแบบแผนผังคลังสินค้าใหม่เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการและการใช้งาน การควบคุมด้วยการมองเห็น (Visual Control) และการจัดการพื้นที่ (Warehouse Layout) ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความสะดวกในการค้นหาและหยิบใช้สินค้า

ผลการวิเคราะห์พบว่า ปัญหาหลักเกิดจากความไม่เป็นระเบียบในการจัดเก็บและขาดความสะดวกในการหยิบใช้เนื่องจากช่องจัดเก็บ 1 ช่องมีสินค้าหลายประเภท (3 SKU) ทำให้การค้นหาและเบิกใช้ล่าช้า ระบบจัดเก็บแบบตำแหน่งตายตัว (Fixed Location System) ซึ่งไม่สอดคล้องกับจำนวนประเภทของสินค้า (Stock Keeping Unit: SKU) ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยจำนวน SKU เพิ่มขึ้นจาก 327 รายการในปี 2563 เป็น 377 รายการในปี 2567 หรือเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 12 รายการต่อปี ภายในระยะเวลา 4 ปี การเพิ่มขึ้นดังกล่าวเกิดจากการขยายประเภทของกระดาษตาม เกรด แกรม และขนาด ที่หลากหลายมากขึ้น ส่งผลให้ระบบจัดเก็บเดิมไม่สามารถรองรับได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดการหยุดการทำงานของเครื่องจักรผลิตกล่องลูกฟูก (Downtime) เนื่องจากต้องรอการจัดส่งม้วนกระดาษ จากข้อมูลการเก็บบันทึกปี 2566 พบว่าอัตราการผลิตกระดาษลูกฟูกเฉลี่ย 8,096 เมตรต่อชั่วโมง หรือคิดเป็นตารางเมตรต่อเมตรเท่ากับ 2.1 เท่า หรือเท่ากับ 17,001 ตารางเมตรต่อชั่วโมง เมื่อคำนวณการสูญเสียเวลาเครื่องจักรหยุดทำงานจากสาเหตุการจอดรอม้วนกระดาษ จำนวน 34 ครั้ง รวมเป็นเวลาทั้งสิ้น 680 นาทีหรือ เท่ากับ 12 ชั่วโมง คิดเป็นการสูญเสียโอกาสในการผลิตเท่ากับ 204,012 ตารางเมตร โดยมูลค่าในการขายเท่ากับตารางเมตรละ 14.50 บาท (อ้างอิงจากราคาขายในปี 2566) รวมมูลค่าความสูญเสียเท่ากับ 2.96 ล้านบาท

ผลจากการปรับปรุงด้วยการประยุกต์ใช้ วิเคราะห์เอฟเอสเอ็น (FSN Analysis) การจำแนกกลุ่มสินค้าคงคลัง ตามการจัดกลุ่มตามอัตราการใช้งานรายการสินค้าที่เคลื่อนไหวเร็ว (Fast Moving : F) เป็นวัตถุดิบที่มีอัตราการใช้งานสูง โดยมีอัตราการใช้งานอยู่ที่ 85.6% ส่วน (Slow Moving : S) เป็นวัตถุดิบที่มีอัตราการใช้งานปานกลาง โดยมีอัตราการใช้งาน อยู่ที่ 10% และ (Non Moving : N) เป็นวัตถุดิบที่มีอัตราการใช้งานต่ำหรือไม่มี การใช้งานเลย โดยมีอัตราการใช้งานอยู่ 4.4% ของอัตราการใช้งานของทั้งหมด (อ้างอิงจากตารางที่2) ร่วมกับการออกแบบแผนผังคลังสินค้าใหม่ ทำให้สามารถลด ขั้นตอนการปฏิบัติงานจาก 5 ขั้นตอนเหลือ 3 ขั้นตอน (ลดลง 40%) ลดเวลาเฉลี่ยในการหยิบใช้ม้วนกระดาษจาก 6 นาที 45 วินาที เหลือเพียง 44 วินาทีต่อครั้ง (ลดลง 89.11%) ต้นทุนแรงงานลดลงจาก 92,065 บาทเหลือ 10,025 บาทต่อปี (ลดลง 82,040 บาท) และไม่พบการหยุดเครื่องจักรหลังการปรับปรุง ผลการศึกษายืนยันว่าการใช้ วิเคราะห์เอฟเอสเอ็น (FSN Analysis) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้าได้อย่างมีนัยสำคัญทั้งด้านเวลา ต้นทุน และความถูกต้องในการ ดำเนินงาน

คำสำคัญ : การจัดการคลังสินค้า, การจัดหมวดหมู่สินค้าคงคลัง, การปรับปรุงประสิทธิภาพ, การควบคุมด้วยการมองเห็น, การออกแบบแผนผังคลังสินค้า

Abstract

This research aims to study the problems and causes of paper roll warehouse management processes and to improve the warehouse management efficiency of a corrugated packaging manufacturing company in Bangkok. The FSN Analysis method was applied to classify materials according to their frequency of use and to allocate appropriate storage areas based on material movement characteristics. This approach enhances the speed and organization of issuing and storing materials. Additionally, problem analysis was conducted using a Fishbone Diagram to identify root causes, along with the design of a new warehouse layout to meet operational needs. Visual Control and Warehouse Layout techniques were implemented to facilitate product retrieval and improve accessibility.

The analysis revealed that the main problem stemmed from disorganized storage and the lack of convenience in retrieval. A single storage location contained multiple product types (3 SKUs), causing delays in searching and picking. The Fixed Location System used was unsuitable for the continuously increasing number of product types (Stock Keeping Units: SKUs). The number of SKUs increased from 327 in 2020 to 377 in 2024, averaging an annual increase of 12 items over four years. This rise resulted from diversification in paper grades, grammages, and sizes, rendering the existing storage system inefficient. Consequently, production downtime occurred in the corrugated box manufacturing process due to waiting for paper roll deliveries. According to the 2023 records, the average corrugated paper production rate was 8,096 meters per hour, equivalent to 17,001 square meters per hour. Machine downtime caused by paper roll waiting occurred 34 times, totaling 680 minutes (12 hours), resulting in a production loss of 204,012 square meters. At a sales value of 14.50 THB per square meter (based on 2023 prices), the total loss was approximately 2.96 million THB.

After implementing FSN Analysis and redesigning the warehouse layout, inventory was classified into three categories based on usage frequency: Fast Moving (F) materials, with a usage rate of 85.6%; Slow Moving (S)

materials, with a usage rate of 10%; and Non Moving (N) materials, with a usage rate of 4.4% (as shown in Table 2). The new layout reduced operational steps from five to three (a 40% reduction), decreased the average paper roll retrieval time from 6 minutes 45 seconds to only 44 seconds per transaction (an 89.11% reduction), and reduced annual labor costs from 92,065 THB to 10,025 THB (a saving of 82,040 THB). No machine downtime occurred after the improvement. The study confirms that FSN Analysis significantly enhances warehouse management efficiency in terms of time, cost, and operational accuracy.

Keywords: Warehouse Management, Inventory Classification, Efficiency Improvement, Visual Control, Warehouse Layout Design

บทนำ

อินเทอร์เน็ต กรุป แพคเกจจิ้ง เป็นหนึ่งในผู้นำทางด้านการผลิตบรรจุภัณฑ์กระดาษลูกฟูกในประเทศไทย โดยทำการผลิตกระดาษคราฟท์ แปรรูป และจัดจำหน่ายบรรจุภัณฑ์กระดาษลูกฟูกอย่างครบวงจร มีบริษัทในเครือทั้งหมด 4 บริษัท ได้แก่ (1). บริษัทอินเทอร์เน็ตไฟเบอร์ คอนเทนเนอร์ จำกัด (2). บริษัทอินเทอร์เน็ต แปซิฟิก เปเปอร์ จำกัด (3). บริษัทอินเทอร์เน็ต อีสเทิร์น คอนเทนเนอร์ จำกัด และ (4). บริษัทอินเทอร์เน็ต ดิจิตอล พรินต์ จำกัด ซึ่งบริษัทที่เป็นกรณีศึกษาคือ บริษัทอินเทอร์เน็ต ไฟเบอร์ คอนเทนเนอร์ จำกัด เป็นธุรกิจเกี่ยวกับผลิตแผ่นกระดาษ และผลิตกล่องบรรจุภัณฑ์กระดาษลูกฟูกครบวงจร ผลิตบรรจุภัณฑ์ตามความต้องการของลูกค้ามาจากระดาษที่ได้รับรองระบบการรับรองผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green Label) และมาจากระบบการจัดการป่าไม้อย่างยั่งยืนตามมาตรฐานสากล ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (บริษัทอินเทอร์เน็ตไฟเบอร์ คอนเทนเนอร์ จำกัด, 2564)

ปัจจุบันมีเทคนิคหลายประการที่ช่วยในการจัดการคลังสินค้า อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยไม่ได้เลือกใช้การวิเคราะห์จัดกลุ่มวัสดุแบบเอบีซี (ABC Analysis) ซึ่งเน้นการบริหารตามมูลค่าและเหมาะกับองค์กรที่มุ่งเน้นการควบคุมต้นทุนและงบประมาณ แต่เลือกใช้วิธีวิเคราะห์เอฟเอสเอ็น (FSN Analysis) แทน เนื่องจากมุ่งเน้นการบริหารตามความถี่ในการเคลื่อนไหวของสินค้า ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายหลักขององค์กรในการเพิ่มความรวดเร็วในการหยิบใช้และความต่อเนื่องของกระบวนการผลิต และจากงานวิจัยของจุติวราช ภูสีม่วง (2565) เรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพการหยิบกรอบแว่นตาโดยวิธีวิเคราะห์เอฟเอสเอ็น (FSN Analysis) กรณีศึกษา บริษัท ไทยออปติคอล จำกัด มหาชน ผลการศึกษาจากการวิเคราะห์แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) พบว่าหมวดปัจจัยด้านกระบวนการ (Method) เป็นส่วนที่ต้องได้รับการปรับปรุงร่วมด้วยหลักการวิธีวิเคราะห์เอฟเอสเอ็น (FSN Analysis) โดยสินค้าส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่ม F (75%) กลุ่ม S (20%) และกลุ่ม N (5%) หลังจากออกแผนผังคลังสินค้าแบบใหม่ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยการสุ่มตัวอย่าง 115 คำสั่ง และหยิบสินค้า 1,306 ชิ้น มาทำการจับเวลา และระยะทางในกระบวนการหยิบ (Picking) และใช้การทดสอบ Paired Sample T-Test พบว่า ผลการหยิบเฉลี่ยจาก 110 วินาทีลดลงเหลือ 78.66 วินาทีระยะทางเดินเปลี่ยนลงจากเดิม 21.37 เมตร ลดลงเหลือ 8.21 เมตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% (จุติวราช ภูสีม่วง, 2565)

ดังนั้นผลจากการดำเนินงานของคลังม้วนกระดาษที่ผ่านมา การจัดการคลังม้วนกระดาษซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต จะมีการจำแนกสินค้าและวัตถุดิบในระบบคลังสินค้า SKU ที่จะช่วยแยกความแตกต่างของแต่ละกลุ่มในประเภทเดียวกัน ไม่ว่าจะเป็น คุณภาพ ประเภทของสีหรือแกรมของกระดาษ ดังสถิติตั้งแต่ปี 2563 พบว่ามีจำนวน SKU ทั้งสิ้นเป็นจำนวน 327 SKU จวบจนปัจจุบันปี 2567 มีจำนวน SKU เพิ่มขึ้นมาจากเดิมเป็นจำนวน 50 SKU รวมเป็น 377 SKU ในปี 2567 อย่างไรก็ตามขั้นตอนการดำเนินงานในคลังม้วนกระดาษแบบเดิมมีระบบการจัดเก็บโดยกำหนดตำแหน่งตายตัว

(Fixed Location System) แต่ด้วยจำนวน SKU ที่เพิ่มขึ้นจึงมีการจัดเก็บรวมในช่องจัดเก็บเดียวกันและใน 1 ช่องการจัดเก็บจะมีรวมกันถึง 3 SKU จากสาเหตุดังกล่าวทำให้การค้นหาม้วนกระดาษที่ต้องการจะทำได้ยากขึ้น ใช้เวลานาน และมีโอกาสเกิดความผิดพลาดในการหยิบใช้ม้วนกระดาษได้ โดยนำทฤษฎีเกี่ยวกับการจัดการคลังสินค้า (Warehouse Management) ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์เอฟเอสเอ็น (FSN Analysis) ทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบแผนผังคลังสินค้า (Warehouse Layout) และทฤษฎีเกี่ยวกับการควบคุมการมองเห็น (Visual Control) เข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการการหยิบใช้ม้วนกระดาษ เพื่อลดเวลาสูญเสียในกระบวนการการหยิบใช้ม้วนกระดาษ ลดขั้นตอนการทำงานซ้ำซ้อนในบางขั้นตอนที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานนานเกินไปทำให้เกิดความล่าช้า มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัญหาและสาเหตุของกระบวนการจัดการคลังม้วนกระดาษกรณีศึกษา บริษัทผลิตบรรจุภัณฑ์กระดาษลูกฟูก ในกรุงเทพมหานคร
2. เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการจัดการคลังม้วนกระดาษผ่านวิธีวิเคราะห์เอฟเอสเอ็น (FSN Analysis) กรณีศึกษา บริษัทผลิตบรรจุภัณฑ์กระดาษลูกฟูก ในกรุงเทพมหานคร

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ผู้ให้ข้อมูลสำคัญ

ผู้ให้ข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบด้วย พนักงานคลังม้วนกระดาษที่ปฏิบัติงานจริงโดยมีประสบการณ์การทำงานมาแล้วไม่น้อยกว่า 6 เดือน

1. ผู้ให้ข้อมูลสำคัญ (Key informant) แบบเจาะจง (Purposive Sampling) ประกอบไปด้วย

1.1 นักวิชาการ	จำนวน 1 ท่าน
1.2 หัวหน้าคลังม้วนกระดาษ	จำนวน 2 ท่าน
1.3 เจ้าหน้าที่คลังรับม้วนกระดาษ	จำนวน 3 ท่าน
1.4 เจ้าหน้าที่คลังจ่ายม้วนกระดาษ	จำนวน 3 ท่าน

โดยผู้ให้ข้อมูลสำคัญ (Key informant) ทั้ง 9 ท่าน เป็นผู้ให้สัมภาษณ์ตามแบบสอบถามทั้งประเด็นปัญหาในกระบวนการทำงานและแสดงความคิดเห็นรวมถึงการเสนอแนะ อีกทั้งหัวหน้าคลังม้วนกระดาษทั้ง 2 ท่านเป็นคนจับเวลาการหยิบใช้ม้วนกระดาษก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

2. การสังเกตการณ์อย่างมีส่วนร่วม (Participant Observation) ได้มีส่วนร่วมในการสังเกตการณ์ในการจัดการคลังและกระบวนการทำงาน เนื่องจากผู้วิจัยเป็นพนักงานของบริษัทที่ใช้ในการศึกษา บริษัทผลิตบรรจุภัณฑ์กระดาษลูกฟูกในกรุงเทพมหานคร

2. ศึกษากระบวนการและขั้นตอนการหยิบใช้ม้วนกระดาษ

ผู้วิจัยได้ศึกษากระบวนการและขั้นตอนในการหยิบใช้ม้วนกระดาษ พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสาเหตุที่ก่อให้เกิดเวลาสูญเสีย ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดังกล่าวมีระยะเวลาในการหยิบใช้ม้วนกระดาษนาน เนื่องจากในแต่ละครั้งที่มีการเบิกใช้ม้วนกระดาษ จำเป็นต้องนำม้วนกระดาษที่ไม่ต้องการออกก่อน และจัดเก็บม้วนดังกล่าวกลับคืนสู่ตำแหน่งเดิมภายหลังการหยิบใช้งาน

ตารางที่ 1 แผนภูมิการไหลกระบวนการดำเนินงานก่อนการปรับปรุง

แผนภูมิกระบวนการไหล(Flow Process Chart)								
แผนภูมิหมายเลข		สรุปผล (ค่าเฉลี่ยของเวลาการหยิบใช้ในแต่ละวันตลอดทั้งเดือน)						
วัสดุ	Activity	ก่อนปรับปรุง		หลังปรับปรุง		ลดลง		
		ครั้ง	นาที	ครั้ง	นาที	ครั้ง	นาที	
	ปฏิบัติ	○	2	1.13				
	เคลื่อนย้าย	⇒	3	5.32				
กิจกรรม : ขั้นตอนการดำเนินงาน		รอคอย	▷					
		ตรวจสอบ	□					
		เก็บ	▽					
วิธีการทำงาน : ก่อนปรับปรุง		รวมทั้งหมด	5	6.45				
รายละเอียดกระบวนการ	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์					หมายเหตุ
			○	⇒	▷	□	▽	
1.เข้าไปที่ตำแหน่งที่ต้องการ	37	0.31	●	⇒	▷	□	▽	
2.เคลื่อนย้ายม้วนที่ไม่ต้องการออก	148	2.28	○	⇒	▷	□	▽	
3.หยิบม้วนที่ต้องการ	9	0.42	●	⇒	▷	□	▽	
4.จัดเก็บม้วนที่ไม่ต้องการเข้าที่เดิม	148	2.49	○	⇒	▷	□	▽	
5.หยิบม้วนที่ต้องการไปจ่าย	37	0.14	○	⇒	▷	□	▽	
รวม	379	6.45						

กิจกรรมที่ทำให้ไม่เพิ่มมูลค่า เนื่องจากหนึ่งช่องจัดเก็บจะมีจำนวน 3 SKU พนักงานต้องทำการเคลื่อนย้ายม้วนที่ไม่ต้องการออกไป เพื่อนำม้วนที่ต้องการจากในแถวออกมาเพื่อไปจ่ายให้ฝ่ายผลิต ดังภาพที่ 1 และ ตารางที่ 1 กระบวนการการทำงานมีขั้นตอนในการหยิบใช้ม้วนกระดาษทั้งหมด 5 ขั้นตอน โดยผู้วิจัยทำการทดสอบและเก็บข้อมูลในแต่ละกระบวนการทำงาน ไม่น้อยกว่า 25 ครั้ง/วัน เป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยคิดเป็นเวลาเฉลี่ยรวม 6.45 นาที เริ่มขั้นตอนที่ 1 เข้าไปที่ตำแหน่งที่ต้องการใช้เวลาเฉลี่ยรวมเป็นเวลา 0.31 นาที ขั้นตอนที่ 2 เคลื่อนย้ายม้วนที่ไม่ต้องการออกใช้เวลาเฉลี่ยรวมเป็นเวลา 2.28 นาที ขั้นตอนที่ 3 หยิบม้วนที่ต้องการใช้เวลาเฉลี่ยรวมเป็นเวลา 0.42 นาที ขั้นตอนที่ 4 จัดเก็บม้วนที่ไม่ต้องการเข้าที่เดิมใช้เวลาเฉลี่ยรวมเป็นเวลา 2.49 นาที และขั้นตอนที่ 5 หยิบม้วนที่ต้องการไปจ่ายให้ฝ่ายผลิตใช้เวลาเฉลี่ยรวมเป็นเวลา 0.14 นาที โดยกระบวนการรวมทั้งหมด 5 ขั้นตอน ใช้เวลา 6.45 นาที



ภาพที่ 1 กระบวนการหยิบใช้ม้วนกระดาษ 5 ขั้นตอน



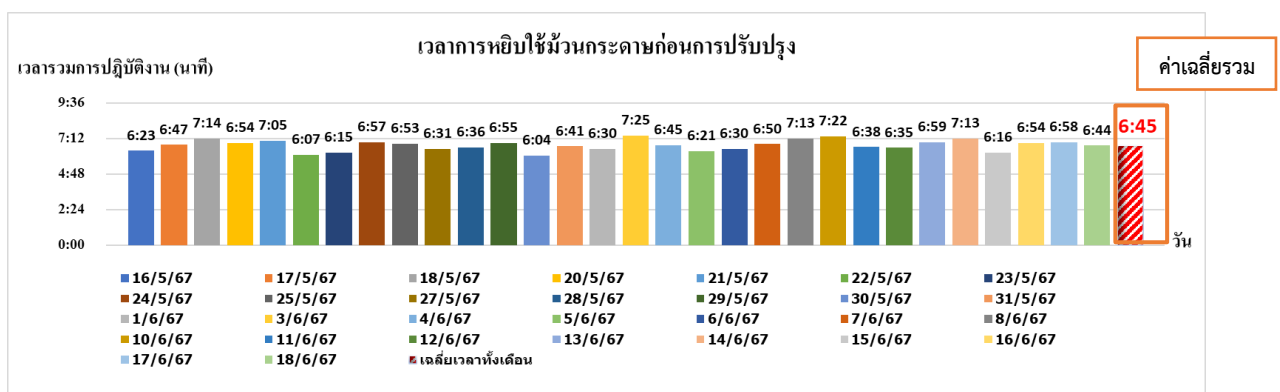
ขั้นตอนที่ 4 เก็บม้วนที่สี่



ขั้นตอนที่ 5 หยิบม้วนที่ต้องการไปจ่ายให้ฝ่ายผลิต (จบกระบวนการ)



ภาพที่ 1 กระบวนการหยิบใช้ม้วนกระดาษ 5 ขั้นตอน (ต่อ)



ภาพที่ 2 ข้อมูลจับเวลาการหยิบใช้ม้วนกระดาษ 5 ขั้นตอนใช้ระยะเวลาเฉลี่ย 1 ม้วนต่อวัน ตามข้อมูลย้อนหลัง 1 เดือน

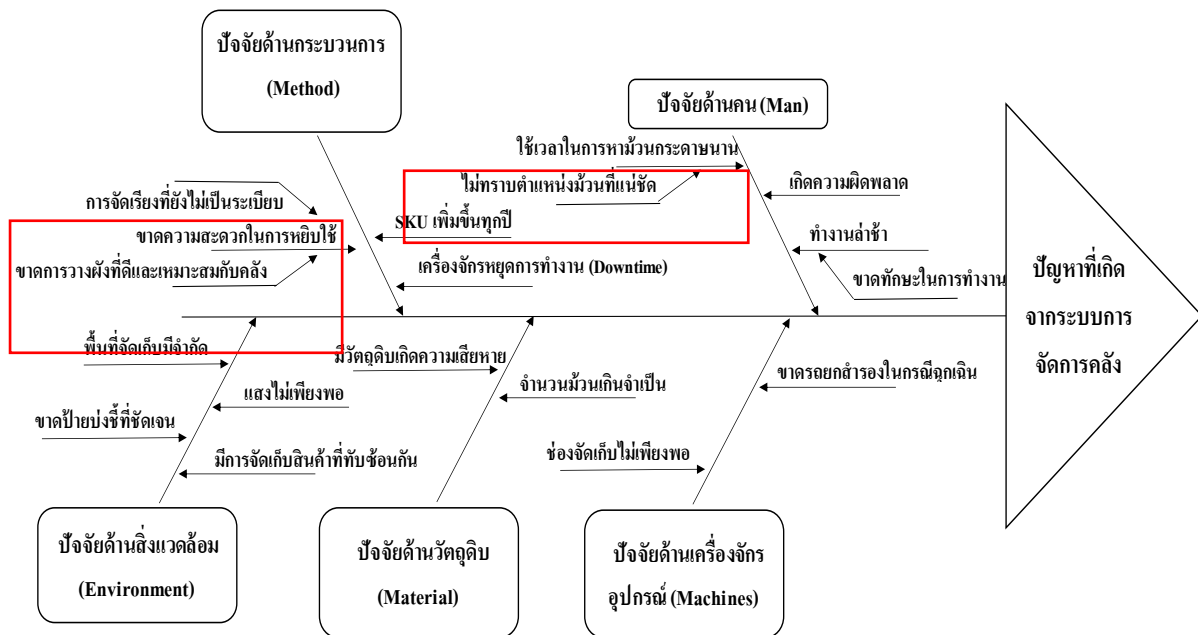
จากภาพที่ 2 เป็นข้อมูลจับเวลาการหยิบใช้ม้วนกระดาษก่อนปรับปรุงมี 5 ขั้นตอน ในภาพเป็นเวลาเฉลี่ยจากการจับเวลาการหยิบใช้ 25 ครั้ง/วัน เป็นระยะเวลา 1 เดือนนับตั้งแต่วันที่ 16 เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2567 ถึงวันที่ 18 เดือนมิถุนายน พ.ศ.2567 โดยหัวหน้าคลังม้วนกระดาษทั้ง 2 ท่านเป็นคนจับเวลาการหยิบใช้ม้วนกระดาษก่อนปรับปรุง ในส่วนของตารางที่ 1 แผนภูมิการไหลกระบวนการดำเนินงานก่อนการปรับปรุง กระบวนการหยิบใช้ม้วนกระดาษก่อนการปรับปรุงใช้เวลาเฉลี่ย 6.45 นาที โดยคำนวณจากค่าเฉลี่ยของเวลาการหยิบใช้ในแต่ละวันตลอดทั้งเดือน

3. สาเหตุของปัญหาในกระบวนการจัดการคลัง

จากการที่ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลกระบวนการไหลงานทั้งหมด 5 ขั้นตอน ในระยะเวลา 1 เดือน ตามภาพที่ 2 และตารางที่ 1 พบว่ามีค่าเฉลี่ยของเวลาการหยิบใช้ในแต่ละวันตลอดทั้งเดือนในการหยิบใช้ม้วนกระดาษ 1 ม้วน เท่ากับ 6.45 นาที โดยพบว่าในกระบวนการทั้งหมดมี 2 ขั้นตอนที่ใช้เวลามากที่สุด คือ ขั้นตอนในกระบวนการเคลื่อนย้าย ซึ่งผู้วิจัยเห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงและตัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นออกได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงตัดสินใจเลือกประเด็นปัญหาที่ใช้เวลามากที่สุดในกระบวนการเคลื่อนย้าย คือ ขั้นตอนที่ 2 เคลื่อนย้ายม้วนที่ไม่ต้องการออก ใช้เวลา 2.28 นาที และ 4 จัดเก็บม้วนที่ไม่ต้องการเข้าที่เดิม ใช้เวลา 2.49 นาที จากกระบวนการทำงานทั้ง 2 ขั้นตอน พบว่าใช้เวลารวมทั้งสิ้น 5.17 นาที คิดเป็นร้อยละ 80.2 ของระยะเวลาเฉลี่ยทั้งหมด 6.45 นาที

การวิเคราะห์ปัญหาโดยทฤษฎีแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram)

แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) เป็นแผนผังสำหรับใช้วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยการหาเหตุและผลของปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างเป็นขั้นตอน ด้วยวิธีการถามซ้ำเพื่อหาสาเหตุของปัญหาย้อนกลับไปเรื่อย ๆ จนเจอต้นตอของปัญหา (ธนัชชา ชลุ่มประเสริฐ, 2565) ปัญหาที่สามารถดำเนินการแก้ไขและควบคุมได้จะอยู่ในส่วนของ Method ปัจจัยด้านกระบวนการและ Man ปัจจัยด้านคน ตามภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนผังก้างปลา ปัญหากระบวนการทำงานภายในคลังม้วนกระดาษ

จากภาพที่ 3 ปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อการใช้ม้วนกระดาษและฝ่ายผลิตต้องจอดเครื่องจักรม้วนกระดาษออกเป็น 2 ปัจจัยดังนี้

1. ปัจจัยด้านกระบวนการ (Method) ขาดความสะดวกในการหยิบใช้ ด้วยจำนวน SKU ที่เพิ่มขึ้นทุกปีเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า จึงมีการจัดเก็บรวมในช่องจัดเก็บเดียวกันและใน 1 ช่องการจัดเก็บจะมีรวมกันถึง 3 SKU รวมถึงขาดการวางผังที่ดีและเหมาะสมกับคลัง และการจัดเรียงที่ยังไม่เป็นระเบียบ การหยิบใช้และการค้นหาม้วนกระดาษล่าช้า ส่งผลให้เกิดการหยุดการทำงานของเครื่องจักรผลิตกล่องลูกฟูก (Downtime)

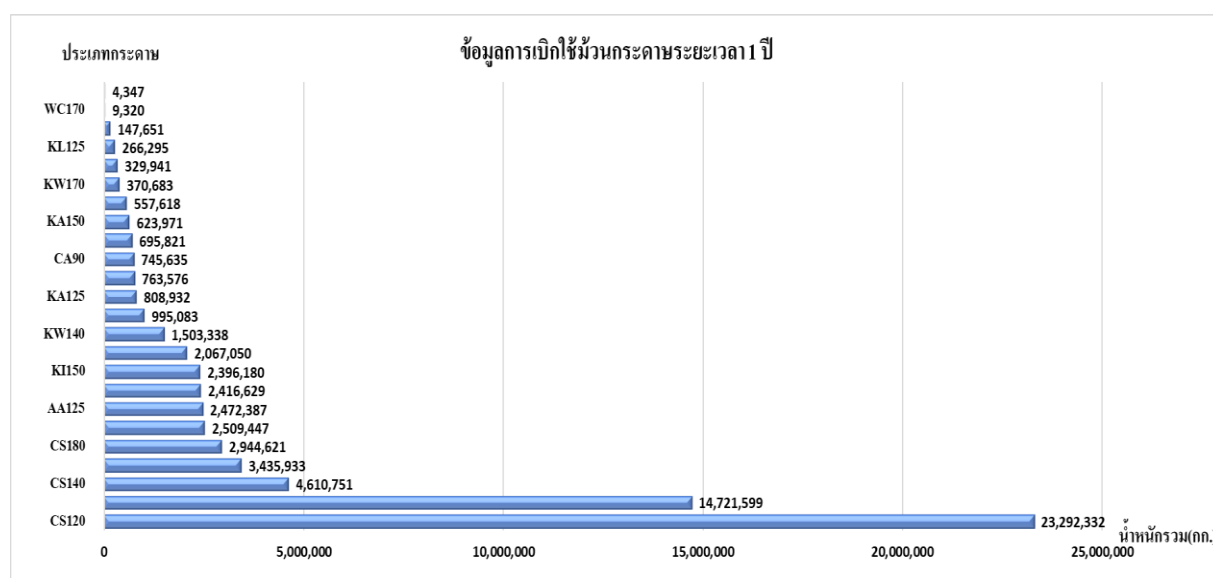
2. ปัจจัยด้านคน (Man) พนักงานยังขาดความชำนาญในการหยิบใช้ ใช้เวลาในการหาม้วนกระดาษนาน เนื่องจากยังไม่ทราบตำแหน่งม้วนที่แน่ชัด

ดังนั้น ผู้วิจัยสรุปได้ว่าปัจจัยสำคัญของปัญหาที่เกิดขึ้นภายในคลังม้วนกระดาษประกอบด้วย 2 ด้านหลัก ได้แก่ ด้านกระบวนการ (Method) และด้านคน (Man) ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการหยิบใช้ม้วนกระดาษและการไหลของกระบวนการผลิต เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงกำหนดแนวทางการวิเคราะห์โดยอ้างอิงวิธีวิเคราะห์ที่เอฟเอสเอ็น (FSN Analysis) ในการจำแนกม้วนกระดาษตามความถี่ในการใช้งาน ร่วมกับการจัดการคลังโดยการออกแบบแผนผังคลังสินค้า (Warehouse Layout) ใหม่ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการปรับปรุงระบบการจัดเก็บและการหยิบใช้วัสดุให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

แนวทางในการปรับปรุงโดยการนำวิธีวิเคราะห์เอฟเอสเอ็น (FSN Analysis) มาประยุกต์ใช้

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสังเกต การสัมภาษณ์ผู้ให้ข้อมูลสำคัญ แผนภูมิการไหลกระบวนการดำเนินงานก่อนการปรับปรุง และแผนผังก้างปลา สามารถสรุปแนวทางการปรับปรุงระบบการจัดการคลังสินค้าหลักๆ ได้ โดยการนำทฤษฎี FSN Analysis มาประยุกต์ใช้ในการแก้กระบวนการได้ดังนี้

1. การแบ่งวัสดุตามความถี่ในการใช้ (FSN Analysis) ใช้วิธีวิเคราะห์เอฟเอสเอ็น (FSN Analysis) เพื่อการคัดแยกวัสดุตามความถี่ในการใช้งาน โดยการกำหนดรูปแบบการจัดเก็บนั้นใช้ข้อมูลการหยิบใช้จำนวนกระดาชจากฐานข้อมูลของ Stock จากการเบิกใช้ย้อนหลัง 1 ปี ตามภาพที่ 4 ซึ่งข้อมูลในช่วงดังกล่าวเป็นข้อมูลที่เบิกใช้ล่าสุดก่อนทำการปรับปรุง และนำมาใช้ในการเป็นตัวแบ่งแยกกลุ่มตามความถี่ในการใช้งาน จากความถี่ในการใช้งานมากไปจนถึงการใช้งานน้อย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับระบบการจัดการคลังวัสดุกระดาช เพื่อลดความล่าช้าในการหยิบใช้วัสดุกระดาช



ภาพที่ 4 ข้อมูลการเบิกใช้วัสดุกระดาชระยะเวลา 1 ปี

การจำแนกกลุ่มสินค้าคงคลังตามการจัดกลุ่มตามทฤษฎีการแบ่งวัสดุตามความถี่ในการใช้ (FSN Analysis) เกียรติพงษ์ กล่าวว่า การจำแนกกลุ่มสินค้าคงคลังตามการจัดกลุ่มตามอัตราการใช้งานรายการสินค้าที่เคลื่อนไหวเร็ว (Fast Moving : F) เป็นวัตถุดิบที่มีอัตราการใช้งานสูง โดยมีอัตราการใช้งานอยู่ที่ 80% ส่วน (Slow Moving : S) เป็นวัตถุดิบที่มีอัตราการใช้งานปานกลาง โดยมีอัตราการใช้งานอยู่ที่ 15% และ (Non Moving : N) เป็นวัตถุดิบที่มีอัตราการใช้งานต่ำหรือไม่มี การใช้งานเลย โดยมีอัตราการใช้งานอยู่ 5% ของอัตราการใช้งานของทั้งหมดผู้วิจัย (เกียรติพงษ์ อุดมธนะธีระ, 2561) ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มวัสดุตามความถี่ในการใช้ (FSN Analysis) จากข้อมูลการเบิกใช้วัสดุกระดาชระยะเวลา 1 ปี ตามตาราง 2

ตารางที่ 2 แบ่งกลุ่มตามทฤษฎีการแบ่งวัสดุตามความถี่ในการใช้ (FSN Analysis)

กลุ่มม้วน กระดาษ	รหัสสินค้า	ขนาด	รายการ	น้ำหนักรวม (ตัน)	ร้อยละ
F	CS120, CS100, CS140, KI125, CS180, KT125, AA125, KT200, KI150	176	9	58,800	85.6
S	KT150, KW140, AA150, KA125, KL205, CA90	100	6	6,884	10
N	KA185, KA150, KI185, KW170, KA230, KL125, KL150	101	7	3,006	4.4
รวม		377	22	68,689	100

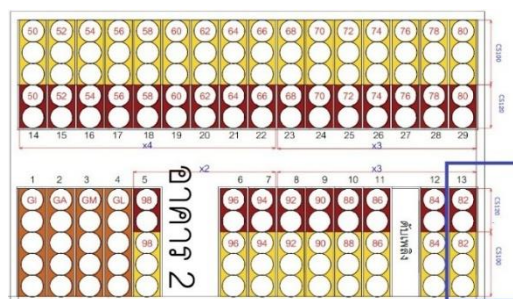
การแบ่งกลุ่มวัสดุตามความถี่ในการใช้ (FSN Analysis) จากข้อมูลการเบิกใช้ม้วนกระดาษระยะเวลา 1 ปี ตามตารางที่ 2 สรุปได้ว่า

1. กลุ่มม้วนกระดาษที่มีการหมุนเวียนเร็ว (Fast Moving, F) มีจำนวน 9 รายการ ได้มีการเบิกใช้ทั้งหมด 58,800 ตัน ของจำนวนการเบิกใช้ทั้งหมด 68,689 ตัน ดังนั้นม้วนกระดาษกลุ่มนี้จะต้องมีการจัดการให้อยู่ในพื้นที่ใกล้และสามารถหยิบใช้ได้สะดวกรวดเร็ว

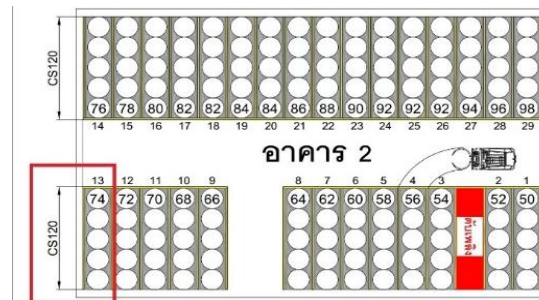
2. กลุ่มม้วนกระดาษที่มีการหมุนเวียนช้า (Slow Moving, S) มีจำนวน 6 รายการ ได้มีการเบิกใช้ทั้งหมด 6,884 ตัน ของจำนวนการเบิกใช้ทั้งหมด ดังนั้นม้วนกระดาษกลุ่มนี้จะมีการใช้น้อย จึงต้องจัดให้ในพื้นที่ที่เหมาะสมและจัดอยู่ในบริเวณพื้นที่กลางๆ จากอาคารทั้งหมด

3. กลุ่มสุดท้ายกลุ่มม้วนกระดาษที่ไม่มีการหมุนเวียน (Non Moving, N) มีจำนวน 7 รายการ ได้มีการเบิกใช้ทั้งหมด 3,006 ตัน ของจำนวนการเบิกใช้ทั้งหมด ซึ่งกลุ่มนี้เป็นม้วนกระดาษที่นานครั้งจะมีการเบิกใช้ ใช้เวลาเดือนหรือไตรมาสถึงจะมีการเบิกใช้ต่อ 1 ครั้ง

2. การจัดการคลังสินค้า (Warehouse Management) เลือกใช้การจัดเก็บโดยกำหนดตำแหน่งตายตัว (Fixed Location System) การกำหนดจุดจัดเก็บสินค้าหรือ SKU ไว้ประจำตำแหน่งเดิมเสมอ (รัตนา ธิญญเจริญ, 2565) โดยการกำหนดม้วนกระดาษทุกชนิดหรือทุก SKU นั้น จะมีตำแหน่งจัดเก็บที่กำหนดไว้ตายตัวตามตัวอย่างภาพแผนผังอาคารจริง ตามภาพที่ 6



ภาพที่ 5 แผนผังอาคาร 2 ก่อนการปรับปรุง

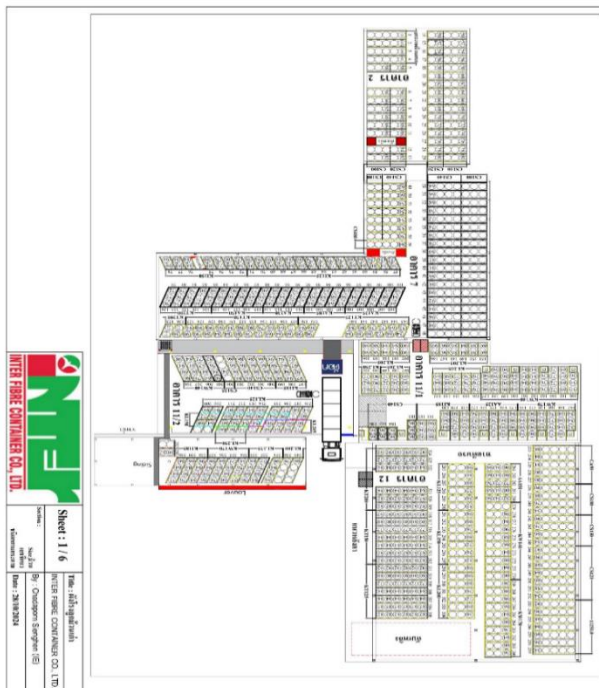


ภาพที่ 6 แผนผังอาคาร 2 หลังการปรับปรุง

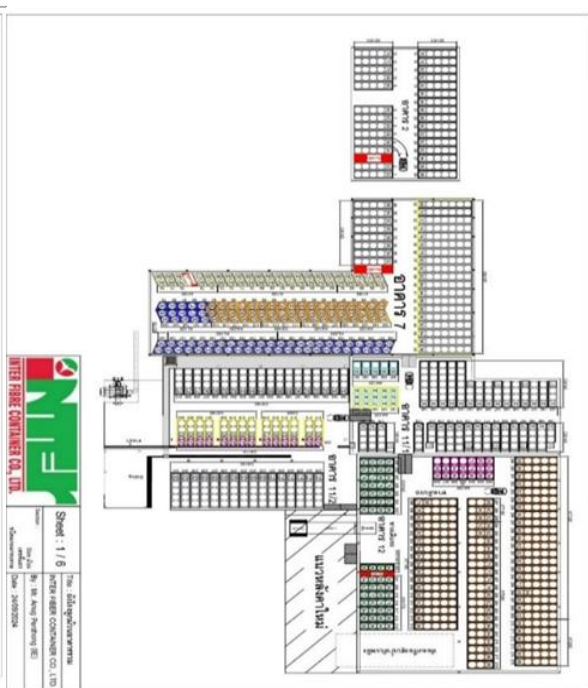
ดังนั้น เมื่อเทียบระหว่างแผนผังอาคาร 2 ก่อนการปรับปรุง ตามภาพที่ 5 ในรอบสีน้ำเงินจะเห็นได้ว่าใน 1 ช่องจัดเก็บเป็นม้วนกระดาษขนาดเดียวกันคือ 82 นิ้ว แต่แกรมกระดาษต่างกัน คือ CS100 และ CS120 ซึ่งจะต่างจากภาพที่ 6 แผนผังอาคาร 2 หลังการปรับปรุง ในรอบสีน้ำเงินจะเห็นได้ว่าใน 1 ช่องจัดเก็บจะมีเป็นม้วนกระดาษเพียงขนาดเดียว และมีเพียงแกรมเดียว

ความหมายของคำว่า “CS120” คือ CS หมายถึง เกรดของม้วนกระดาษ และ 120 หมายถึง แกรมของม้วนกระดาษที่สามารถเก็บในช่องจัดเก็บนั้น จะไม่มีการผสม SKU ของเกรดและแกรมอีกต่อไป

3. การออกแบบแผนผังคลังสินค้า (Warehouse Layout) ทำการออกแบบแผนผังพื้นที่ (Layout) เพื่อจัดวางม้วนกระดาษและการจัดเก็บสินค้าตามการจัดการคลังสินค้า (Warehouse Management) รูปแบบการจัดเก็บโดยกำหนดตำแหน่งตายตัว (Fixed Location System) และการแบ่งกลุ่มตามทฤษฎีการแบ่งวัสดุตามความถี่ในการใช้ (FSN Analysis) ตามภาพที่ 6 โดยวิเคราะห์จากพื้นที่คลังที่มีอย่างเหมาะสมและปริมาณของการเบิกใช้ม้วนกระดาษระยะเวลาย้อนหลัง 1 ปี



ภาพที่ 7 แผนผังอาคารก่อนการปรับปรุง



ภาพที่ 8 แผนผังอาคารหลังการปรับปรุง

การออกแบบแผนผังคลังสินค้า (Warehouse Layout) ตามภาพที่ 8 ผู้วิจัยได้ออกแบบแผนผังอาคารใหม่หลังการปรับปรุง โดยมีการจัดแบ่งโซนสำหรับจัดเก็บม้วนกระดาษใหม่ให้แตกต่างจากแผนผังก่อนการปรับปรุงตามภาพที่ 7 อย่างชัดเจน โดยใช้แนวคิดการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่งตายตัว (Fixed Location System) ร่วมกับการวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มวัสดุตามความถี่ในการใช้งาน (FSN Analysis) สำหรับกลุ่มม้วนกระดาษที่มีการหมุนเวียนสูง (Fast Moving, F) จำนวน 9 รายการ มีปริมาณการเบิกใช้รวม 58,800 ตัน คิดเป็นร้อยละ 85.6 ของการเบิกใช้ทั้งหมด 68,689 ตัน กลุ่มนี้จึงถูกจัดให้อยู่ในพื้นที่ใกล้ประตูทางเข้าเบิกใช้ เพื่อให้สามารถหยิบใช้งานได้สะดวกรวดเร็ว โดยผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างม้วนกระดาษประเภท CS120 ตามข้อมูลจากภาพที่ 4 ซึ่งมีปริมาณการเบิกใช้สูงสุด 23,292 ตัน ให้จัดเก็บในอาคาร 2 ซึ่งอยู่ใกล้ประตูทางเข้าเบิกจ่ายมากที่สุด เพื่อให้การจัดเก็บและการหยิบใช้มีประสิทธิภาพสูงสุด

4. การควบคุมการมองเห็น (Visual Control) มีการนำเอา Visual control มาใช้เพื่อช่วยการสื่อสารผ่านการมองเห็น โดยการสื่อสารนั้นจะถูก ทำในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ป้ายสัญลักษณ์ แถบสี เครื่องหมาย รูปภาพ กราฟ ฯลฯ โดยผู้วิจัยได้นำการควบคุมการมองเห็น (Visual Control) รูปแบบสีมาใช้ในการจัดการคลัง โดยการทาสีพื้นของช่องจัดเก็บตามการแบ่งประเภทกระดาษในแผนผังอาคารหลังการปรับปรุงตามภาพที่ 8 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการมองเห็นและการปฏิบัติได้ดีขึ้น

สรุปผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามวิธีการที่กำหนด และพบปัญหาในกระบวนการหยิบใช้ม้วนกระดาษ โดยเฉพาะในส่วนของเวลาในการทำงานที่สูญเสียของทั้งพนักงานและเครื่องจักร จากข้อมูลที่รวบรวมได้ นำไปใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและแนวทางการปรับปรุงแก้ไข ด้วยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) ร่วมกับแผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart) จากการศึกษาพบว่า แผนผังการจัดการคลังสินค้าก่อนการปรับปรุง แม้จะใช้ระบบกำหนดตำแหน่งตายตัว (Fixed Location System) แต่มีการจัดเก็บม้วนกระดาษแบบผสม 3 SKU ต่อหนึ่งช่องจัดเก็บ ส่งผลให้กระบวนการหยิบใช้งานจำเป็นต้องใช้เวลามากขึ้น ทั้งในส่วนของเคลื่อนย้ายและการค้นหากระดาษที่ต้องการ ซึ่งยังส่งผลกระทบต่อฝ่ายผลิต เนื่องจากเกิดความล่าช้าในการจัดส่งม้วนกระดาษ กระบวนการหยิบใช้ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ได้แก่ 1. เข้าไปยังตำแหน่งจัดเก็บ 2. ล้อม้วนกระดาษ 3. หยิบม้วนที่ต้องการ 4. เก็บม้วนที่ล้อม และ 5. นำม้วนที่ต้องการไปจ่าย จากการจับเวลาการทำงานตลอดระยะเวลา 30 วัน พบว่าใช้เวลาเฉลี่ยในการหยิบม้วนกระดาษอยู่ที่ 6 นาที 45 วินาทีต่อม้วน เมื่อพิจารณาแผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart) พบว่าสามารถลดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นออกได้ 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 2 (ล้อม้วน) และขั้นตอนที่ 4 (เก็บม้วนที่ล้อม) ตามที่แสดงในภาพที่ 9

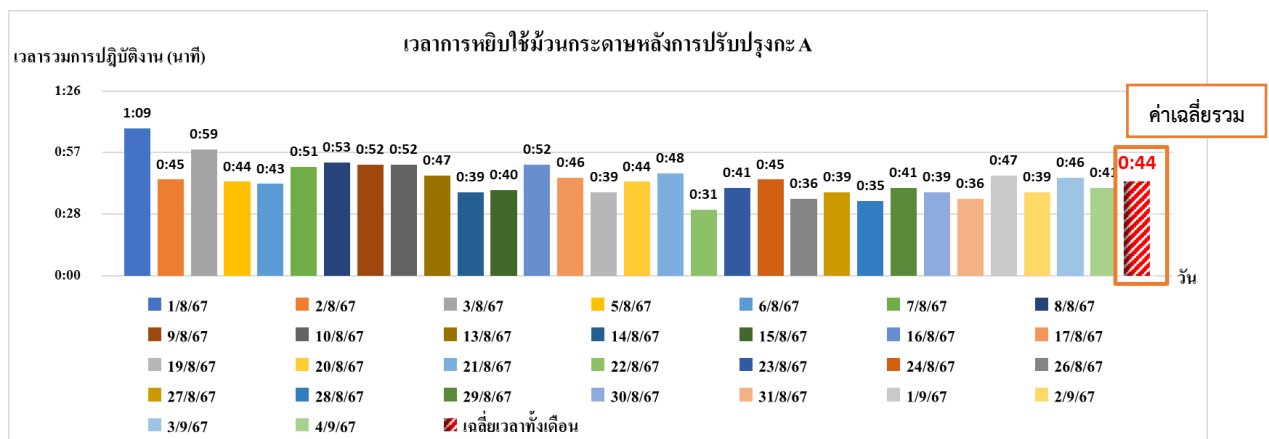
แผนภูมิกระบวนการไหล(Flow Process Chart)						
แผนภูมิหมายเลข	สรุปผล (ค่าเฉลี่ยของเวลาการหยิบใช้ในแต่ละวันตลอดทั้งเดือน)					
วัสดุ	Activity	ก่อนปรับปรุง		หลังปรับปรุง		ลดลง
		ครั้ง	นาที	ครั้ง	นาที	
	ปฏิบัติ ○			2	0.25	
	เคลื่อนย้าย ⇌			1	0.19	
กิจกรรม : ขั้นตอนการดำเนินงาน	รอคอย D					
	ตรวจสอบ □					
	เก็บ ▽					
วิธีการทำงาน : หลังปรับปรุง	รวมทั้งหมด			3	0.44	

ภาพที่ 9 แผนภูมิการไหลกระบวนการดำเนินงานหลังการปรับปรุง

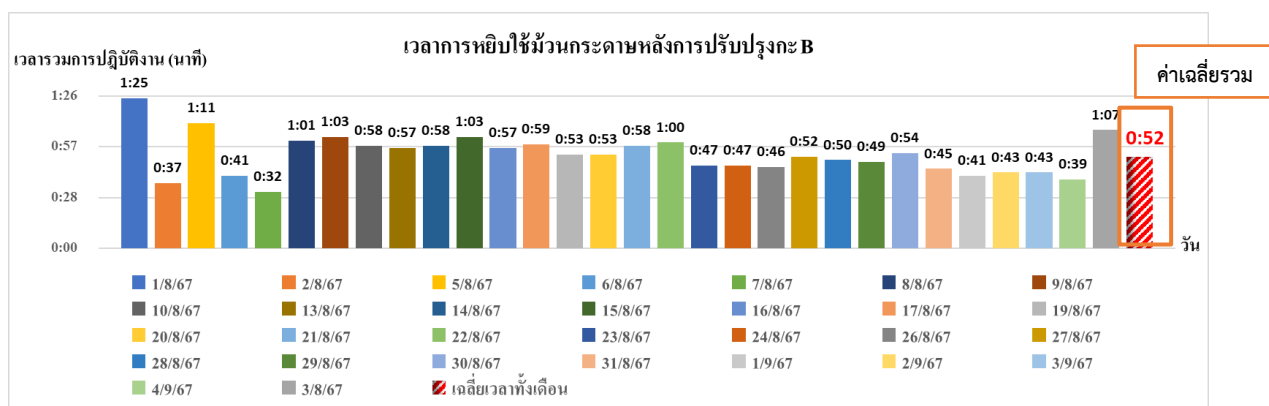
รายละเอียดกระบวนการ	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์					หมายเหตุ
			○	⇒	D	□	▽	
1.เข้าไปที่ตำแหน่งที่ต้องการ	23	0.17	●	⇒	D	□	▽	
2.เคลื่อนย้ายม้วนที่ไม่ต้องการออก			○	⇒	D	□	▽	
3.หยิบม้วนที่ต้องการ	3	0.08	●	⇒	D	□	▽	
4.จัดเก็บม้วนที่ไม่ต้องการเข้าที่เดิม			○	⇒	D	□	▽	
5.หยิบม้วนที่ต้องการไปจ่าย	23	0.19	○	⇒	D	□	▽	
รวม	49	0.44						

ภาพที่ 9 แผนภูมิการไหลกระบวนการดำเนินงานหลังการปรับปรุง (ต่อ)

จากการรวบรวมข้อมูลสรุปได้ว่า การจัดการคลังตามแผนผังหลังการปรับปรุง ใช้แนวความคิดการจัดเก็บม้วนกระดาษโดยกำหนดตำแหน่งตายตัว (Fixed Location System) ม้วนกระดาษทุก SKU จะมีช่องและตำแหน่งที่เก็บโดยเฉพาะชัดเจน รวมถึงประยุกต์ใช้ร่วมกับทฤษฎี FSN Analysis และการออกแบบแผนผังคลังสินค้า (Warehouse Layout) ผลจากการจับเวลาการหยิบใช้ม้วนกระดาษของกะ A ตามภาพที่ 10 และกะ B ตามภาพที่ 11 ใช้การจับเวลาวันละ 25 ครั้ง ในระยะเวลา 30 วัน กระบวนการทำงานในการหยิบใช้ม้วนกระดาษในแผนผังหลังการปรับปรุงมีเพียง 3 ขั้นตอน คือ 1. เข้าไปที่ตำแหน่งที่ต้องการ 2. หยิบม้วนที่ต้องการ และ 3. หยิบม้วนที่ต้องการไปจ่าย

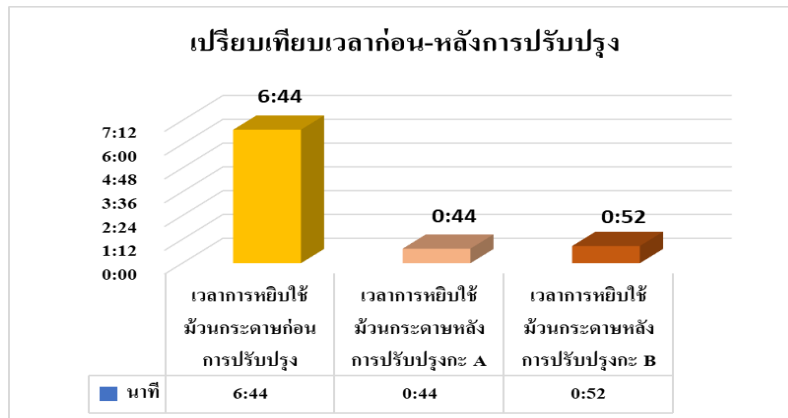


ภาพที่ 10 การใช้ระยะเวลาหยิบใช้ 3 ขั้นตอนของกะ A เฉลี่ย 1 ม้วนต่อวัน ตามข้อมูลย้อนหลัง 1 เดือน



ภาพที่ 11 การใช้ระยะเวลาหยิบใช้ 3 ขั้นตอนของกะ B เฉลี่ย 1 ม้วนต่อวัน ตามข้อมูลย้อนหลัง 1 เดือน

เมื่อทำการปรับปรุงแผนผังทำให้ลดกระบวนการทำงานได้ถึง 2 ขั้นตอน ซึ่งจากการรวบรวมข้อมูลการจับเวลาในการหยิบใช้ตามแผนผังหลังการปรับปรุง เมื่อนำมาคำนวณเวลาการหยิบใช้ม้วนกระดาษของกะ A มีค่าเฉลี่ยเวลาการหยิบม้วนคือ 44 วินาที/ม้วน และกะ B มีค่าเฉลี่ยเวลาการหยิบม้วนคือ 52 วินาที/ม้วน ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 เปรียบเทียบเวลาการหยิบใช้ก่อน-หลังการปรับปรุง

อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาเรื่องการประยุกต์ใช้ทฤษฎี FSN Analysis เพื่อช่วยให้การจัดการคลังม้วนกระดาษเกิดประสิทธิภาพ กรณีศึกษา บริษัทอินเตอร์ไฟเบอร์คอนเทนเนอร์ จำกัด กรุงเทพมหานคร สามารถอภิปรายผลการวิจัยได้ ดังนี้

วัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อศึกษาปัญหาและสาเหตุของกระบวนการจัดการคลังม้วนกระดาษกรณีศึกษา บริษัทอินเตอร์ไฟเบอร์คอนเทนเนอร์ จำกัด

จากผลการศึกษา พบว่า จากข้อมูลที่รวบรวมปัจจัยด้านกระบวนการ (Method) โดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) นำไปใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและแนวทางการปรับปรุงแก้ไข ร่วมกับแผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart) พบปัญหาในกระบวนการหยิบใช้ม้วนกระดาษ โดยเฉพาะในส่วนของเวลาในกระบวนการทำงานที่สูญเสียไปในขั้นตอนที่ 2 (ลื้อม้วน) และขั้นตอนที่ 4 (เก็บม้วนที่ลื้อ) จากการวัดผลจากการนำแนวทางการปรับปรุงระบบการจัดการคลังม้วนกระดาษไปทดลองใช้ดังกล่าว ใช้ตัวชี้วัดและวิธีการประเมินประสิทธิภาพโดยแผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart) เปรียบเทียบผลก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง เป็นการบันทึกข้อมูลจากการจับเวลาของกระบวนการทำงานจริงก่อนปรับปรุง ทั้งหมด 30 วัน โดยใช้ตัวชี้วัดและวิธีการประเมินประสิทธิภาพโดยแผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart) ใช้เวลาเฉลี่ยรวมของการเบิกใช้จากทั้งหมด 5 ขั้นตอน การดำเนินงานรวมทั้งหมด 6 นาที 45 วินาทีต่อครั้ง และการบันทึกข้อมูลจากการจับเวลาของกระบวนการทำงานจริงหลังปรับปรุงทั้งหมด 30 วัน โดยใช้ตัวชี้วัดและวิธีการประเมินประสิทธิภาพโดยแผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart) ใช้เวลาเฉลี่ยรวมของการเบิกใช้จากทั้งหมด 3 ขั้นตอน การดำเนินงานรวมทั้งหมด 44 วินาทีต่อครั้ง ดังนั้น เปรียบเทียบผลก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง (1) สามารถลดขั้นตอนและกระบวนการทำงานจากทั้งหมด 5 ขั้นตอน ลดลงเหลือทั้งหมด 3 ขั้นตอน สามารถลดได้ถึง 2 ขั้นตอน คิดเป็นร้อยละ เท่ากับ 40.00% (2) สามารถลดเวลาจากการดำเนินงานรวมทั้งหมด 6 นาที 45 วินาที/ครั้ง ลดลงเหลือ 44 วินาที/ครั้ง สามารถลดเวลาจากการดำเนินงานทั้งหมด 6 นาที/ครั้ง คิดเป็นร้อยละ เท่ากับ 89.11%

วัตถุประสงค์ที่ 2 เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการจัดการคลังม้วนกระดาษผ่านแนวคิดทฤษฎี FSN Analysis กรณีศึกษา บริษัทอินเตอร์ไฟเบอร์คอนเทนเนอร์ จำกัด

จากผลการศึกษา พบว่าปัจจัยด้านคน (Man) ผู้วิจัยนำหลักการ FSN Analysis มาประยุกต์ใช้ในการจัดการคลังม้วนกระดาษ โดยแบ่งประเภทม้วนกระดาษตามความถี่ในการใช้งาน เพื่อจัดระเบียบการจัดเก็บให้เหมาะสมกับพฤติกรรมการเบิกใช้ ข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์มาจากรฐานข้อมูลการเบิกใช้ย้อนหลัง 1 ปี ซึ่งเป็นข้อมูลล่าสุดก่อนการปรับปรุง เพื่อจัดลำดับความถี่และจัดกลุ่มวัสดุ ผลการวิเคราะห์พบว่า กลุ่ม F (Fast-Moving) มีจำนวนทั้งหมด 9 รายการ จากทั้งหมด 22 รายการ น้ำหนักเบิกรวม 58,800 ตัน (85.6%) เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานถี่มาก ควรจัดเก็บใกล้ประตูหรือในตำแหน่งที่หยิบใช้งานได้สะดวกที่สุด กลุ่ม S (Slow-Moving) มี 6 รายการ น้ำหนักเบิกรวม 6,884 ตัน (10%) เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานปานกลาง ควรจัดเก็บในพื้นที่กลางของอาคาร กลุ่ม N (Non-moving) มี 9 รายการ น้ำหนักเบิกรวม 3,006 ตัน (4.4%) เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานน้อยมาก ใช้ระยะเวลา 1 เดือนหรือ 1 ไตรมาสต่อการเบิกหนึ่งครั้งจึงควรจัดเก็บในพื้นที่ส่วนไกลสุด ใช้การออกแบบแผนผังคลังสินค้า (Warehouse Layout) ถูกจัดทำขึ้นตามกลุ่มความถี่การใช้งาน ร่วมกับใช้แนวความคิดการจัดการคลังสินค้า (Warehouse Management) ของ James and Jerry (1998 อ้างถึงใน รัตนา ธัญญเจริญ, 2565) เลือกใช้รูปแบบการจัดเก็บม้วนกระดาษ โดยกำหนดตำแหน่งตายตัว (Fixed Location System) เพื่อให้การค้นหาและการหยิบใช้ม้วนกระดาษเป็นไปอย่างรวดเร็ว ลดความล่าช้า ลดความเสียหาย และลดการปะปนของม้วนกระดาษได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังม้วนกระดาษ ได้ดังนี้ (1) สามารถลดต้นทุนค่าแรง จากการคำนวณประสิทธิภาพการทำงาน พบว่าหลังการปรับปรุงกระบวนการสามารถลดเวลาในการปฏิบัติงานในแต่ละครั้งได้ 360 วินาที/ครั้ง โดยในระยะเวลา 1 ปีมีจำนวนการเบิกใช้ม้วนกระดาษทั้งสิ้น 39,378 ครั้ง คิดเป็นเวลา 14,176,080 วินาที เท่ากับ 164.08 วัน โดยค่าแรงเจ้าหน้าที่ที่มีค่าเฉลี่ย 15,000 บาทต่อเดือนหรือ 500 บาทต่อวัน ดังนั้น ต้นทุนค่าแรงลดลงหลังการปรับปรุง โดยนำค่าแรง 500 บาท x 164.08 วัน เท่ากับ 82,040 บาทต่อปี (2) สามารถลดมูลค่าการสูญเสียโอกาสในการผลิตได้ ดังนี้ ก่อนการปรับปรุงในรอบ 1 ปี พบปัญหาหยุดการทำงานของเครื่องจักรผลิตกล่องลูกฟูก จำนวน 34 ครั้ง สูญเสียการผลิตไป 12 ชั่วโมง คิดเป็นมูลค่า 2,958,174 บาท และหลังการปรับปรุงได้รวบรวมข้อมูล Down time จากรฐานข้อมูล Database ของเครื่องผลิตกระดาษลูกฟูกของบริษัทอินเตอร์ไฟเบอร์คอนเทนเนอร์ จำกัด เป็นระยะเวลา 1 เดือน ในเดือนสิงหาคม ปี 2567 ไม่พบสาเหตุการหยุดการทำงานของเครื่องจักรผลิตกล่องลูกฟูก มูลค่าการสูญเสียเท่ากับ 0 บาท

ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยเรื่อง การประยุกต์ใช้ทฤษฎี FSN Analysis เพื่อช่วยให้การจัดการคลังม้วนกระดาษเกิดประสิทธิภาพ การศึกษา บริษัทอินเตอร์ไฟเบอร์คอนเทนเนอร์ จำกัด กรุงเทพมหานคร ขอเสนอข้อเสนอแนะในงานวิจัย ดังนี้

1. ควรจัดทำหลักสูตรการอบรมให้พนักงานเกี่ยวกับทฤษฎี FSN Analysis เพื่อเพิ่มความเข้าใจและปฏิบัติตามอย่างเคร่งครัด
2. ควรมีการจัดทำป้ายบ่งชี้เกี่ยวกับป้ายฉลากสินค้า (Label) โดยการแยกสีของป้ายตามไตรมาสนำมาใช้ร่วมกับแนวคิด FIFO (First In, First Out) เพื่อง่ายต่อการมองเห็นและง่ายต่อการหยิบใช้ม้วนกระดาษที่ต้องการทำให้สินค้าเข้าก่อนออกก่อน และลดปัญหาสินค้าค้างสต็อก
3. ควรมีระบบ ERP (Enterprise Resource Planning) เพื่อรวบรวมและประมวลผลข้อมูลการเคลื่อนไหวของสินค้าแบบเรียลไทม์
4. การวิจัยในครั้งนี้จัดทำเพียงการปรับปรุงระบบการจัดการคลังสินค้า การจัดเก็บแบบ FSN Analysis และการออกแบบ layout เท่านั้น ดังนั้นถ้ามีการพัฒนาการเก็บข้อมูล และการปรับเพิ่มไปถึงการใช้ Big Data ร่วมกับ Machine

Learning ในการวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนไหวของสินค้าจากหลายแหล่ง เช่น ยอดขาย ความต้องการลูกค้า หรือแนวโน้มตลาด จะทำให้การจัดการสินค้าคงคลังมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- จิตวิรรษ ภูสีมิ่ง. (2565). *การเพิ่มประสิทธิภาพการหยิบกรอขว่นตาโดยทฤษฎี FSN – ANALYSIS กรณีศึกษา บริษัท ไทย ออฟติคอล จำกัด มหาชน*. [การค้นคว้าอิสระวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, กรุงเทพฯ.
- ชนิกานต์ เปรมปรีดี. (2566). *การจัดการคลังสินค้า กรณีศึกษา กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรหนองตูมพัฒนา ตำบลหนองตูม อำเภอกงไกรลาศ จังหวัดสุโขทัย*. [การค้นคว้าอิสระปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. สาขาวิชาเทคโนโลยีผู้ประกอบการ และการจัดการนวัตกรรม, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- ธนชาา ชลุ่มประเสริฐ. (2565). *การเพิ่มประสิทธิภาพการจัดฝ่งคลังสินค้า กรณีศึกษา บริษัท ABC จำกัด*. [การค้นคว้าอิสระปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน, มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี.
- ธีรวัฒน์ แก่นในเมือง. (2564). *การใช้วิธีวิเคราะห์เอฟเอสเอ็น และอีซีอาร์เอส สำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า กรณีศึกษา บริษัท AAA*. [การค้นคว้าอิสระวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี.
- บริษัท อินเตอร์ กรุ๊ป แพคเกจจิ้ง จำกัด. (2567, 28 สิงหาคม). *ประวัติความเป็นมา*. <https://www.inter-group.co.th/>
- บริษัท อินเตอร์ไฟเบอร์ คอนเทนเนอร์ จำกัด. (2567, 28 สิงหาคม). *ประวัติความเป็นมา*. <https://www.inter-group.co.th/>
- รัตนา ัญญเจริญ. (2565). *แนวทางการปรับปรุงระบบการจัดการคลังสินค้าสำเร็จรูปด้วยวิธี ABC Analysis กรณีศึกษา บริษัท จำหน่ายอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในจังหวัดสมุทรสาคร*. [การค้นคว้าอิสระปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต]. คณะบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- อภิศักดิ์ วงศ์สนธิ. (2563). *การจัดการคลังสินค้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเก็บสินค้า*. [การค้นคว้าอิสระปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต]. สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, กรุงเทพฯ.
- Amri Yanuar. (2020). *ANALISIS PENGENDALIAN PERSEDIAAN MENGGUNAKAN FSN ANALYSIS PADA WAREHOUSE UKM ONLINE*. Program Studi D4 Logistik Bisnis.
- Hudori, M., & Niro Tami, B. (2019). *Pengelompokan Persediaan Barang Dengan Metode FSN Analysis (Fast, Slow and Non-moving) Berdasarkan Turn Over Ratio (TOR)*. Program Studi Manajemen Logistik.
- Tambunan, M., Syahputri, K., Rizkya, I., Sari, R., Cahyo, M. (2018). *Storage design using Fast moving, Slow moving and Non moving (FSN) analysis*. Department of Industrial Engineering, Faculty of Enginnering, Universitas Sumatera Utara.

Translated Thai References

- Poosimuang, J. (2022). *Efficiency Improvement of Eyeglass Picking Using FSN Analysis: A Case Study of Thai Optical Group PCL*. [Master's Independent Study, Dhurakij Pundit University]. Master of Engineering in Engineering Management, Dhurakij Pundit University, Bangkok.

- Prampree, C. (2023). *Warehouse management: A case study of Nong Toom Phatthana Agricultural Housewives Group, Nong Toom Sub-district, Kong Krailat District, Sukhothai Province*. [Master's independent study]. Naresuan University, Phitsanulok.
- Khluiprasert, T. (2022). *Increasing Efficiency of Warehouse Layout: A Case Study of ABC Company*. [Master's independent study]. Faculty of Logistics, Burapha University, Chonburi.
- Kannaimuang, T. (2024). *Using FSN analysis and ECRS methods for improving warehouse management efficiency: case studies of AAA company*. (Master of Engineering Independent Study). Department of Industrial Engineering, Thammasat University, Pathum Thani.
- Inter Group Packaging Co., Ltd. (2024, August 28). *History*. <https://www.inter-group.co.th/>
- Inter Fibre Container Co., Ltd. (2024, August 28). *History*. <https://www.inter-group.co.th/>
- Thanyajarean, R. (2022). *A Guideline to Improve the Warehouse Management of the Instant Products with the ABC Analysis: A Case Study of an Electronics Distributor in Samut Sakhon Province*. [Master of Business Administration Independent Study]. Faculty of Business Administration, Thonburi University, Bangkok.
- Wongsanit, A. (2020). *On Warehouse Management to Increase the Efficiency of Product Storage*. [Master of Business Administration Independent Study]. Logistics and Supply Chain Management, Dhurakij Pundit University, Bangkok.

Received: Aug 14, 2025

Revised: Nov 14 , 2025

Accepted: Dec 5, 2025

การศึกษาผลของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นที่มีผลต่อค่าความจุของขั้วลบในแบตเตอรี่รถไฟฟ้า

STUDY OF THE EFFECTS OF CARBON BLACK IN EXPANDER ON CAPACITY OF NEGATIVE ELECTRODE IN TRACTION BATTERY

สมศักดิ์ มีนกร¹, วรเทพ ตรีวิจิตร¹, สมจินต์ อักษรธรรม^{1*}, กษิติศ ดาวเรือง¹, ธีระพงษ์ มณีเพ็ญ²

คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธนบุรี¹

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี²

Somsak Meenakorn¹, Worathep Treewichit¹, Somjin Aksorntham¹, Kasidit Daoruang¹,

Theerapong Maneepen²

Faculty of Engineering, Thonburi University¹

Faculty of Industrial Education and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi²

*Corresponding Author, E-mail: somjin072@gmail.com

บทคัดย่อ

วัสดุกระตุ้นเป็นส่วนผสมหลักของขั้วลบมีคุณสมบัติในการเพิ่มค่าความจุและจำนวนรอบต่อการใช้งานประกอบด้วย แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate) โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต (Sodium lignosulfonate) และคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) โดยเฉพาะคาร์บอนแบล็คมีหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้ามีผลมาจากคุณสมบัติในการจับกลุ่มของอนุภาคจำนวนมากในลักษณะที่เป็น กิ่งก้านหรือสายโซ่ มีความเป็นรูพรุนสูง อย่างไรก็ตามบทบาทของคาร์บอนแบล็คต่อค่าความจุของขั้วลบแบตเตอรี่รถไฟฟ้ายังไม่ชัดเจนนอกจากนั้นยังไม่ทราบอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสม เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง Auto lab PGSTAT30 (Cyclic Voltammetry) ส่วนการทดสอบโครงสร้างของคาร์บอนแบล็คโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) จากการศึกษาพบว่าค่าความจุของขั้วลบสูงขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็คเท่ากับโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตจะปฏิสัมพันธ์กับคาร์บอนแบล็คจับกัน เป็นกลุ่ม เรียกว่ากลุ่มคาร์บอน-โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต ซึ่งค่าความจุที่สูงขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนแบล็ค โซเดียมลิกโนซัลโฟเนตเท่ากับ 6:6

คำสำคัญ : คาร์บอนแบล็ค, วัสดุกระตุ้น, ค่าความจุ, แบตเตอรี่รถไฟฟ้า

Abstract

The expander materials are the main components of the negative electrode, which have the properties of increasing the capacity and number of cycles per use, and include barium sulfate, sodium lignosulfonate, and carbon black. In particular, carbon black has the function of being an electrical conductor due to its property of aggregating a large number of particles in a branched or chain-like

manner, with high porosity. However, the role of carbon black on the negative terminal capacity of electric vehicle batteries is still unclear, and the optimum weight ratio is also unknown. The testing equipment used includes electrochemical property testing using the cyclic voltammetry (CV), transmission electron microscope (TEM) and scanning electron microscope (SEM) were used to investigate the capacity of the negative electrode and to examine structure of the expander, respectively. From the study, it was also found that capacity of the electrode was high when the amount of carbon black was equal to that of lignosulfonate. This phenomenon is related to the structure of sodium lignosulfonate interacting with carbon black to form groups, called lignosulfonate-carbon black cluster. The maximum capacity was obtained when the weight ratio of carbon black: sodium lignosulfonate is 6:6.

Keywords: Carbon black, Expander materials, Capacity, Traction battery

บทนำ

แบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นแบตเตอรี่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดมีส่วนแบ่งทางการตลาดมากกว่าครึ่งหนึ่งของตลาดแบตเตอรี่ทั่วไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งแต่ละบริษัทยังคงใช้วัตถุดิบหลักคือตะกั่ว เพื่อทำการผลิตแบตเตอรี่ตะกั่วกรดเนื่องจากวัตถุดิบมีราคาถูกเหมาะสมในเชิงพาณิชย์มากกว่าวัตถุดิบชนิดอื่น ๆ สามารถจัดหาง่ายและมีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อนประกอบกับการต้องการส่งเสริมการผลิตแบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่มีอยู่ในปัจจุบันให้มีศักยภาพและความเข้มแข็งมากยิ่งขึ้น ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจะมีข้อดีจากตะกั่วที่มีลักษณะพูน (Pb) ส่วนข้อเสียเป็นตะกั่วออกไซด์ (PbO_2) โดยมีกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้นเป็นอิเล็กโทรไลต์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ แบตเตอรี่ปฐมภูมิ และแบตเตอรี่ทุติยภูมิ แบตเตอรี่รถไฟฟ้าเป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่ใช้เป็นกำลังขับเคลื่อนยานพาหนะที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่หลากหลายอาทิเช่น รถยก รถเข็นวีลแชร์ เรือ และรถไฟใต้ดิน ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่รถไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอายุการใช้งาน ค่าความจุของแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับขนาดของแบตเตอรี่ ซึ่งมีวัสดุผสม (Active materials) เป็นวัสดุส่วนผสมทางเคมีใช้สำหรับฉาบลงบนโครงกริดของขั้วลบ จะทำหน้าที่เป็นวัสดุที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าส่งผลต่อค่าความจุของพลังงาน อายุการใช้งาน เวลาการประจุ เวลาการคายประจุ และความเร็วในการก่อตัวมีองค์ประกอบหลัก ๆ เช่น ผงตะกั่วออกไซด์ (Lead oxide) โยผสม (Dyneal flocc) วัสดุกระตุ้น (Expander materials) กรดกำมะถัน (Sulfuric acid) น้ำกลั่น (Water) และวาสลีน (Vaseline) เป็นต้น

วัสดุกระตุ้นเป็นส่วนผสมหลักของขั้วลบมีคุณสมบัติในการเพิ่มค่าความจุและจำนวนรอบต่อการใช้งานประกอบด้วย แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate) โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต (Sodium lignosulfonate) และคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) ซึ่งแบเรียมซัลเฟตมีคุณสมบัติในการเพิ่มค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อน โซเดียมลิกโนซัลโฟเนตมีคุณสมบัติในการเพิ่มพื้นที่ผิวและลดอุณหภูมิจากการใช้งาน (Boden D.P. และคณะ, 2014) ส่วนคาร์บอนแบล็คมีหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าหรือสะพานไฟ สามารถนำไฟฟ้าได้ดีมีผลมาจากคุณสมบัติในการจับกลุ่มของอนุภาคจำนวนมากในลักษณะที่เป็นกิ่งก้านหรือสายโซ่ มีความเป็นรูพรุนสูง และคุณภาพในการเกาะกลุ่ม (Aggregate) ซึ่งจะส่งผลต่อการนำไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างของคาร์บอนแบล็คประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ที่มีความสำคัญ ลักษณะรูปแบบ และจำนวนของอนุภาคเล็ก ๆ ในการรวมตัวเป็นลักษณะการเกาะกลุ่มเข้าด้วยกัน (Atanassova P. และคณะ, 2013) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ Low, Medium และ High structure คาร์บอนแบล็ค ประเภท Low structure การรวมตัวการจับกลุ่มของอนุภาคค่อนข้างน้อยมีขนาดเล็กส่งผลทำให้มีรูปแบบเป็นกิ่งก้านและสายโซ่เป็นท่อนสั้น ๆ ส่วน High structure จะมีลักษณะเฉพาะของการจับกลุ่มกันค่อนข้างมีขนาดใหญ่ส่งผลทำให้มีรูปแบบเป็นกิ่งก้านและสายโซ่ที่ยาวต่อเนื่องมากกว่า ซึ่งคาร์บอนแบล็คแบตเตอรี่ตะกั่วกรดจะให้ค่าความจุ

และจำนวนรอบจากการใช้งานของขั้วลบเพิ่มขึ้น เมื่อวัสดุกระตุ้นมีปริมาณคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) เท่ากับปริมาณลิกโนซัลโฟเนต (Lignosulfonate) (Moseley P.T. และคณะ, 2006)

จากการศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้จะเห็นแนวทางการหาค่าความจุของขั้วลบจากผลของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้น ซึ่งคาร์บอนแบล็คจะช่วยลดการสะสมของตะกั่วซัลเฟตและสร้างโครงข่ายการนำไฟฟ้าบนตะกั่วซัลเฟต ถ้าเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็คจะทำการกีดขวางการเกิดตะกั่วซัลเฟตในการประจุไฟฟ้า ส่วนโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวบนตะกั่วทำให้ค่าความจุเพิ่มขึ้นอยู่ในขอบเขต แต่ถ้าผสมจนเกินขอบเขตจะส่งผลต่อการเพิ่มความหนาของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตบนพื้นที่ผิวของตะกั่วและจะกีดขวางการเคลื่อนย้ายประจุผลที่ตามมาทำให้ค่าความจุลดลง อย่างไรก็ตามบทบาทของคาร์บอนแบล็คต่อค่าความจุของขั้วลบแบตเตอรี่ไฟฟ้ายังไม่ชัดเจนนอกจากนี้ยังไม่ทราบอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสมของธาตุเหล่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจทำการศึกษาค่าความจุของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นที่มีผลต่อค่าความจุของขั้วลบในแบตเตอรี่ไฟฟ้า

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาผลของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นที่มีผลต่อค่าความจุของขั้วลบในแบตเตอรี่ไฟฟ้า

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัสดุกระตุ้น (Expander materials) จะประกอบด้วยแบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate) โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต (Sodium lignosulfonate) และคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate) ซึ่งคุณสมบัติของแบเรียมซัลเฟตในการทำปฏิกิริยาเป็นตัวนำซัลเฟตในช่วงแบตเตอรี่ไม่ได้ชาร์จไฟฟ้าสามารถละลายได้ในกรดซัลฟูริกจะทำหน้าที่ในการจับ $PbSO_4$ เพื่อไม่ให้ $PbSO_4$ เกิดเป็นฟิล์มบน Pb

1.2 โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต (Sodium lignosulfonate) ซึ่งคุณสมบัติของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตจะประสานเนื้อวัสดุเพิ่มความต้านทานด้านความร้อนของแผ่นธาตุและเพิ่มอายุของแผ่นธาตุทำหน้าที่ในการจับ Pb เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฟิล์มของ $PbSO_4$ เคลือบบน Pb

ตารางที่ 1 การเตรียมวัสดุกระตุ้น (Expander materials)

วัสดุกระตุ้น (Expander materials)	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (Weight ratio)		
	แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate)	โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต (Sodium lignosulfonate)	คาร์บอนแบล็ค (Carbon black)
XE8862	88	6	2
XE8864	88	6	4
XE8866	88	6	6
XE8868	88	6	8
XE88610	88	6	10
XE88612	88	6	12

1.3 คาร์บอนแบล็ค (Carbon black) เป็นชนิดโครงสร้างสูง (High structure) ซึ่งคุณสมบัติของคาร์บอนแบล็คเป็นตัวทำปฏิกิริยาช่วยในการชาร์จไฟฟ้าและดิสชาร์จของแบตเตอรี่ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าหรือสะพานไฟ

2. ขั้นตอนการผสมวัสดุกระตุ้นด้วยเครื่องผสมความเร็วรอบสูง (Bench top mini speed mixers) ใช้ความเร็วรอบการผสม 500 รอบ/นาที และระยะเวลาการผสม 2 นาที สำหรับการเลือกวัสดุกระตุ้นที่ใช้เป็นต้นแบบในการวิจัยครั้งนี้ได้อ้างอิงจาก (Meenakorn S., 2010) ซึ่งขั้นตอนการผสมวัสดุกระตุ้นดังนี้

2.1 เตรียมสารผสมแบเรียมซัลเฟต โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต และคาร์บอนแบล็คชนิดโครงสร้างสูง (High structure)

2.2 นำสารเคมีทั้ง 3 ประเภทที่เตรียมไว้ชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งดิจิตอล ค่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักตามตารางที่ 1

2.3 ทำการผสมวัสดุกระตุ้นแต่ละสูตรการผลิตจนครบ

3. เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบดังนี้

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการผสมวัสดุกระตุ้นด้วยเครื่องผสมความเร็วรอบสูง (Bench top mini speed mixers) โดยใช้ความเร็วรอบการผสม 500 รอบ/นาที และระยะเวลาการผสม 2 นาที ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักตามตารางที่ 1

3.2 เครื่อง Auto lab PGSTAT30 (Cyclic Voltammetry) เป็นเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของวัสดุกระตุ้นชนิด XE8862, XE8864, XE8866, XE8868, XE88610, XE88612 และ HE115 (Commercial grade) ในการทดสอบจะต้องจัดเตรียมตะกั่วให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ตารางเซนติเมตร การตั้งเครื่องจะต้องตั้งค่าให้อยู่ในช่วง -0.30 ถึง -0.90V อัตราการสแกนอยู่ที่ 20 mV/s ใช้กรดซัลฟูริก 1.25 g-cm⁻³ โดยการเตรียมวัสดุกระตุ้นให้มีความเข้มข้น 20 ppm

3.3 เครื่อง JEOL JEM-2010 TEM (Transmission Electron Microscope) เป็นเครื่องทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เพื่อทดสอบองค์ประกอบโครงสร้างของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นชนิด XE8866 และ HE115 (Commercial grade)

3.4 เครื่อง FEI Nova Nano SEM450 (Scanning Electron Microscope) เป็นการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อทดสอบโครงสร้างของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นชนิด XE8866

4. การวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเครื่อง Auto lab PGSTAT30 (Cyclic Voltammetry) และแปลค่า

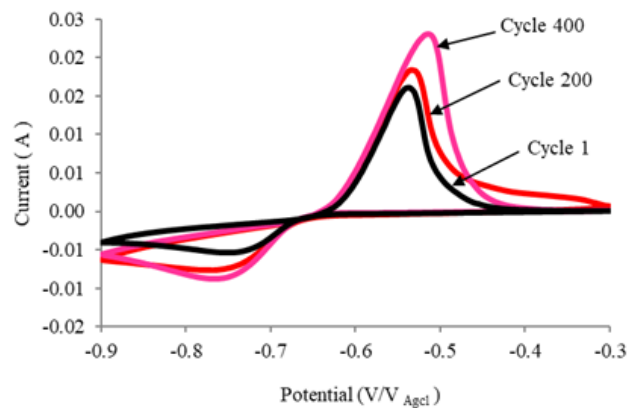
4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านด้วยเครื่อง JEOL JEM-2010 TEM (Transmission Electron Microscope) และแปลค่า

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยเครื่อง FEI Nova Nano SEM450 (Scanning Electron Microscope) และแปลค่า

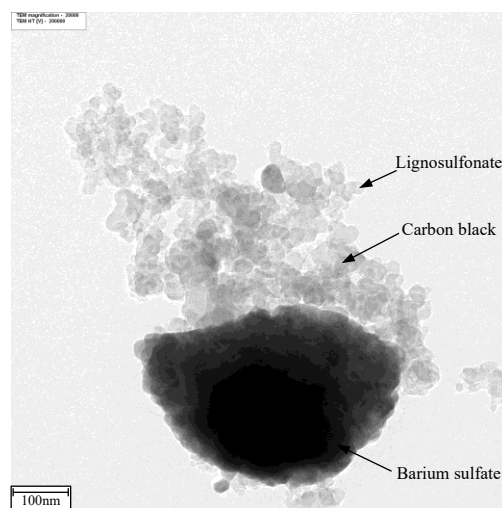
ผลการดำเนินการ

จากการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (Cyclic voltammogram) ของตะกั่วบริสุทธิ์ การตั้งค่าอยู่ในช่วง -0.30 ถึง -0.90V อัตราการสแกนอยู่ที่ 20 mV/s ใช้กรดซัลฟูริก 1.25 g-cm⁻³ โดยให้มีความเข้มข้น 20 ppm ของวัสดุกระตุ้นชนิด XE8866 ด้วยเครื่องมือที่ใช้ในการผสมวัสดุกระตุ้นด้วยเครื่องผสมความเร็วรอบสูง (Bench top mini speed mixers) ประกอบด้วยแบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate) โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต (Sodium lignosulfonate) และคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) ในอัตราส่วนผสมความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และระยะเวลาการผสม 2 นาที จากภาพที่ 1 โซเดียมลิกโน

ซัลโฟเนตและคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นจะส่งผลต่อค่าความจุที่สูงขึ้นจากจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าของขั้วบวก สูงเพิ่มขึ้นจากการขยายตัวของกระแสไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มศักยภาพนำไปสู่ค่าความจุที่สูงขึ้น



ภาพที่ 1 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (Cyclic voltammogram) ของตะกั่วบรสิทุธ์ การตั้งค่าอยู่ในช่วง -0.30 ถึง -0.90V อัตราการสแกนอยู่ที่ 20 mV/s ใช้กรดซัลฟูริก 1.25 g-cm⁻³ โดยให้ความเข้มข้น 20 ppm ของวัสดุกระตุ้น XE8866

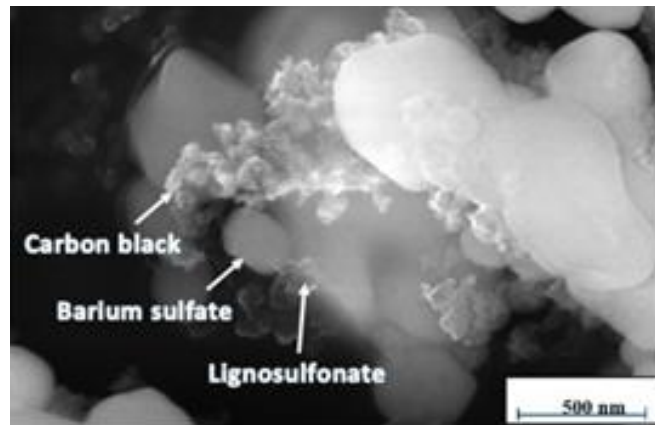


ภาพที่ 2 การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope) วัสดุกระตุ้น XE8866

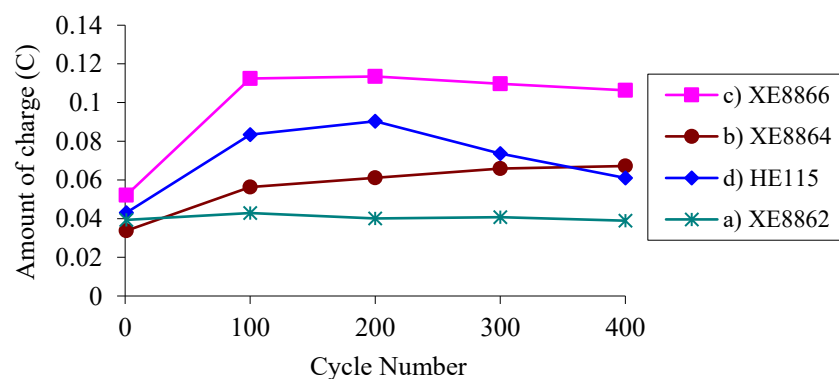
จากภาพที่ 2 การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope) ของวัสดุกระตุ้น XE8866 ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบโครงสร้างของวัสดุกระตุ้นพบว่า วัสดุสีดำเป็นแบเรียมซัลเฟต กลุ่มสีเทาเป็นคาร์บอนแบล็ค และกลุ่มสีเทาบาง ๆ เป็นโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต การจับกันเป็นกลุ่มจะมีขนาดแตกต่างกัน

จากภาพที่ 3 การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) วัสดุกระตุ้น XE8866 ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบโครงสร้างของวัสดุกระตุ้นพบว่า แบเรียมซัลเฟตและโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตถูก

เคลือบด้วยคาร์บอนแบล็ค ซึ่งโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตจะปฏิสัมพันธ์กับคาร์บอนแบล็คจับกันเป็นกลุ่ม เรียกว่ากลุ่มคาร์บอน-โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต

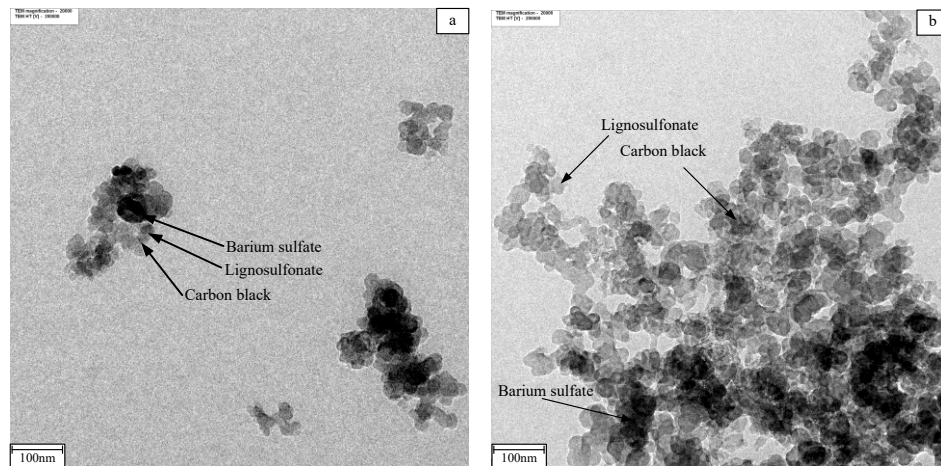


ภาพที่ 3 การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) วัสดุกระตุ้น XE8866



ภาพที่ 4 ปริมาณประจุและจำนวนรอบของตะกั่วบริสุทธิ์ขนาด 1.25 g-cm^{-3} ในกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 20 ppm ของวัสดุกระตุ้น a) XE8862, b) XE8864, c) XE8866, and d) HE115 (commercial expander)

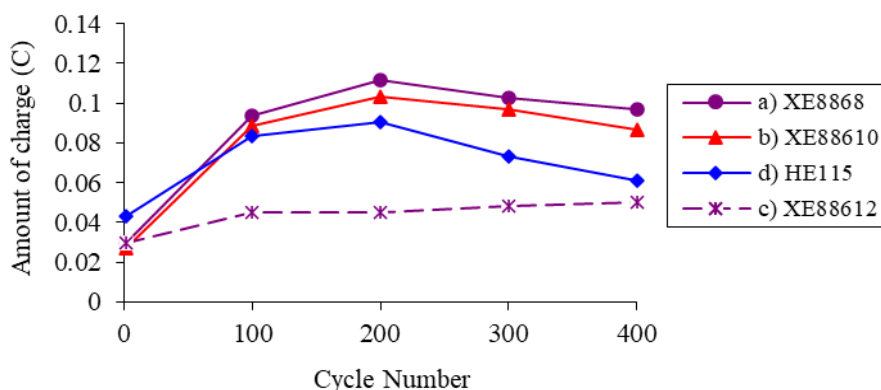
จากภาพที่ 4 ปริมาณประจุและจำนวนรอบจากผลของคาร์บอนแบล็คต่อค่าความจุของขั้วลบ เมื่อปริมาณแบเรียมซัลเฟตมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 88 และโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 6 ซึ่งเป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักคงที่ จะเห็นได้ว่าค่าความจุสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณของคาร์บอนแบล็คเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนแบล็คน้อยที่สุดเท่ากับ 6 จะมีค่าความจุสูงกว่าวัสดุกระตุ้น HE115



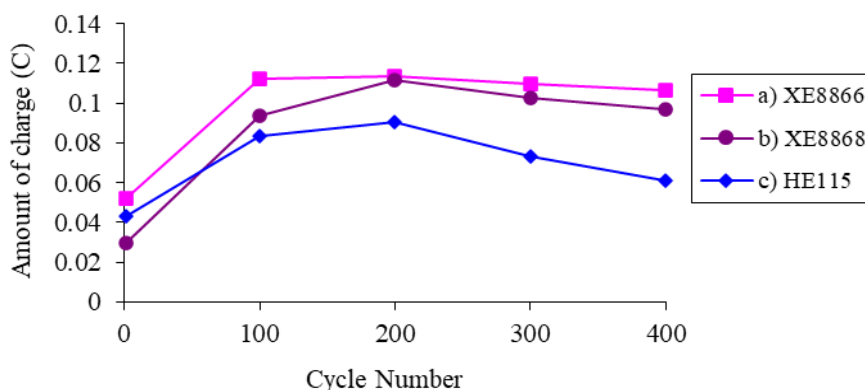
ภาพที่ 5 การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope) ของวัสดุกระตุ้น (a) HE115 และ (b) XE8866

จากภาพที่ 5 การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope) ของวัสดุกระตุ้น HE115 และ XE8866 พบว่าโครงสร้างของวัสดุกระตุ้น XE8866 มีการจับกันเป็นกลุ่ม ซึ่งโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตจะปฏิสัมพันธ์กับคาร์บอนแบล็คจับกันเป็นกลุ่ม เรียกว่ากลุ่มคาร์บอน-โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต ส่วนโครงสร้างวัสดุกระตุ้น HE115 จะมีโครงสร้างการจับกลุ่มคาร์บอน-โซเดียมลิกโนซัลโฟเนตที่เล็กกว่าจากการเปรียบเทียบกับ XE8866

จากภาพที่ 6 ปริมาณประจุและจำนวนรอบจากผลของคาร์บอนแบล็คต่อค่าความจุของขั้วลบ พบว่าปริมาณของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้น XE8868 และ XE88610 ส่งผลต่อค่าความจุของขั้วลบโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ จะเห็นได้ว่าค่าความจุเมื่อมีปริมาณของคาร์บอนแบล็คน้อยที่สุดเท่ากับ 8 จะมีค่าความจุสูงกว่าวัสดุกระตุ้น HE115 เมื่อมีปริมาณของแบเรียมซัลเฟตและโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตในอัตราส่วนโดยน้ำหนักคงที่ 88 และ 6 ตามลำดับ



ภาพที่ 6 ปริมาณประจุและจำนวนรอบของตะกั่วบริสุทธิ์ขนาด $1.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ในกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 20 ppm ของวัสดุกระตุ้น a) XE8868, b) XE88610, c) XE88612, and d) HE115 (commercial expander)



ภาพที่ 7 ปริมาณประจุและจำนวนรอบของตะกั่วบริสุทธิ์ขนาด 1.25 g-cm^{-3} ในกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 20 ppm ของวัสดุกระตุ้น a) XE8866, b) XE8868, and c) HE115 (commercial expander)

จากภาพที่ 7 ปริมาณประจุและจำนวนรอบจากผลของคาร์บอนแบล็คต่อค่าความจุของขั้วลบ พบว่าค่าความจุของขั้วลบในวัสดุกระตุ้น XE8866 และ XE8868 ให้ค่าความจุของขั้วลบใกล้เคียงกัน โดยความเสถียรของการประจุไฟฟ้าของขั้วลบมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกัน ซึ่งค่าความจุของขั้วลบสูงสุดอยู่ในช่วง 200 รอบ หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลง อย่างไรก็ตามค่าความจุของวัสดุกระตุ้น XE8866 จะสูงมากกว่าวัสดุกระตุ้น XE8868 เล็กน้อยหลังจากอยู่ในช่วง 200 รอบขึ้นไป ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความจุเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนแบล็คที่ถูกจำกัดไว้ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 6 ซึ่งจะต้องเท่ากับปริมาณโซเดียมลิเทียมลิโธฟอสเฟต

สรุปผลและการอภิปราย

จากการศึกษาผลของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นที่มีผลต่อค่าความจุของขั้วลบในแบตเตอรี่รีไฟฟ้ จากผลการวิเคราะห์ปริมาณประจุและจำนวนรอบของตะกั่วบริสุทธิ์ขนาด 1.25 g-cm^{-3} ในกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 20 ppm ของวัสดุกระตุ้น XE8862, XE8864, XE8866, XE8868, XE88610, XE88612 และ HE115 (commercial expander) แต่ละชนิดให้ค่าความจุแตกต่างกัน ซึ่งสามารถอภิปรายได้ดังนี้

ผลของคาร์บอนแบล็คต่อค่าความจุของขั้วลบ จากภาพที่ 4 ซึ่งอัตราส่วนโดยน้ำหนักมีค่าคงที่ เมื่อปริมาณแบเรียมซัลเฟตมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 88 และโซเดียมลิเทียมลิโธฟอสเฟตในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 6 พบว่าค่าความจุของขั้วลบเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณของคาร์บอนแบล็คในอัตราส่วนโดยน้ำหนักมากที่สุดเท่ากับ 6 จะให้ค่าความจุของขั้วลบสูงกว่าวัสดุกระตุ้น HE115 จะเห็นได้ว่าคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นจะปรับปรุงคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Abhishek J. และ คณะ, (2015) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับบทบาทของคาร์บอนในแผ่นลบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด พบว่าคาร์บอนแบล็คจะสร้างโครงข่ายการนำไฟฟ้าบนตะกั่วซัลเฟต และช่วยปรับปรุงความสามารถการประจุไฟฟ้าในแผ่นธาตุลบ และยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Hai-Yan Hu และคณะ, (2019) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดกำลังขับเคลื่อนด้วยสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็ค พบว่าผลของคาร์บอนแบล็คในขั้วลบของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดมีผลต่อประสิทธิภาพการคายประจุ และอายุการใช้งานยาวนาน ซึ่งประสิทธิภาพคาร์บอนแบล็คเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวของคาร์บอนแบล็คจะช่วยยับยั้งการเกิดตะกั่วซัลเฟตบนพื้นที่ผิวขั้วลบได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังช่วยปรับปรุงการรับประจุของแบตเตอรี่ ซึ่งจากการทดสอบ โวลแทมเมตรี (CV) ของวัสดุกระตุ้น XE8866 จะให้ค่าความจุสูงกว่าวัสดุกระตุ้น

HE115 สามารถอธิบายได้จากโครงสร้างของวัสดุกระตุ้น จากภาพที่ 5 การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) จากการหาความสัมพันธ์ของโครงสร้างวัสดุกระตุ้น พบว่าวัสดุสีดำเป็นแบเรียมซิลเฟต กลุ่มสีเทาเป็นคาร์บอนแบล็ค และกลุ่มสีเทาบาง ๆ เป็นโซเดียมลิเทียมโพลีเมอร์ โครงสร้างวัสดุมีการจับกันเป็นกลุ่ม ซึ่งโซเดียมลิเทียมโพลีเมอร์จะปฏิสัมพันธ์กับคาร์บอนแบล็คจับกันเป็นกลุ่ม เรียกว่ากลุ่มคาร์บอน-โซเดียมลิเทียมโพลีเมอร์ ส่วนโครงสร้างวัสดุ HE115 จะมีโครงสร้างการจับกลุ่มคาร์บอน-โซเดียมลิเทียมโพลีเมอร์ที่เล็กกว่าวัสดุกระตุ้น XE8866 ซึ่งจากการจับกลุ่มคาร์บอน-โซเดียมลิเทียมโพลีเมอร์ที่มีขนาดใหญ่และพื้นที่ที่มากกว่าจะส่งผลทำให้สามารถจัดเก็บค่าความจุได้ดีกว่า

ผลของคาร์บอนแบล็คต่อค่าความจุของขั้วลบ จากภาพที่ 6 ซึ่งปริมาณของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้น XE8868 และ XE88610 ส่งผลต่อพฤติกรรมและค่าความจุของขั้วลบใกล้เคียงกัน โดยให้ค่าความจุเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของคาร์บอนแบล็ค น้อยสุดเท่ากับ 8 มีค่าความจุสูงกว่าวัสดุกระตุ้น HE115 เมื่อปริมาณของแบเรียมซิลเฟตและโซเดียมลิเทียมโพลีเมอร์ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักอยู่ที่ 88 และ 6 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นจะปรับปรุงคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Xuesong L. และคณะ, (2024) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของคาร์บอนแบล็คต่อการนำไฟฟ้าและสารเหนียวนำไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน พบว่าการลดปริมาณสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าคาร์บอนแบล็คเป็นสารเติมแต่งสำคัญต่อการนำไฟฟ้าในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน แม้ว่าจะมีสัดส่วนเพียง 5-8% ของมวลอิเล็กโทรดก็ตาม คาร์บอนแบล็คก็มีอิทธิพลอย่างมากต่อการนำไฟฟ้าบนพื้นที่ผิวจะส่งผลอย่างมากต่อโครงสร้าง รูพรุน และสภาพการนำไฟฟ้าอิเล็กโทรดในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด และยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Hiral N. และคณะ, (2004) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของการเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็คมากเกินขอบเขตจะส่งผลทำให้ค่าความจุลดลง พบว่าการเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็คมากเกินขอบเขตทำให้เกิดการอุดตันของวัสดุกระตุ้น ซึ่งปริมาณของคาร์บอนแบล็คอาจไปเพิ่มจำนวนการสร้างโครงข่ายการนำไฟฟ้าบนพื้นผิวของอนุภาคตะกั่วและเกิดการกีดขวางการถ่ายโอนประจุ จึงส่งผลทำให้ค่าความจุของขั้วลบลดลง

ผลของคาร์บอนแบล็คต่อค่าความจุของขั้วลบ จากภาพที่ 7 ซึ่งปริมาณของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้น XE8866 และ XE8868 ส่งผลต่อพฤติกรรมและค่าความจุของขั้วลบใกล้เคียงกัน พบว่าค่าความจุของขั้วลบเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณของคาร์บอนแบล็คในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 6 จะให้ค่าความจุของขั้วลบสูงกว่าวัสดุกระตุ้น HE115 จะเห็นได้ว่าคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นจะปรับปรุงคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Boden D.P. และคณะ, (2014) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุกระตุ้นของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด พบว่าวัสดุกระตุ้นประกอบด้วยคาร์บอนแบล็คในปริมาณที่มีความเข้มข้นสูงถึง 6% จะส่งผลต่อการลดลงของการสะสมตะกั่วซิลเฟตบนพื้นผิวของขั้วลบในระหว่างการทำงานของแบตเตอรี่ และยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Blecua M. และคณะ, (2017) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของวัสดุคาร์บอนและลิเทียมโพลีเมอร์ในวัสดุกระตุ้นของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดสำหรับยานยนต์ไฮบริด พบว่าสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุกระตุ้น ได้แก่คาร์บอนแบล็ค และโซเดียมลิเทียมโพลีเมอร์จะปรับปรุงจำนวนรอบจากการใช้งานเพื่อช่วยชะลอการเกิดตะกั่วซิลเฟตในขั้วลบ ซึ่งยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Xuesong L. และคณะ, (2024) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของคาร์บอนแบล็คต่อการนำไฟฟ้าและสารเหนียวนำไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน พบว่าการลดปริมาณสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าคาร์บอนแบล็คเป็นสารเติมแต่งสำคัญต่อการนำไฟฟ้าในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน แม้ว่าจะมีสัดส่วนเพียง 5-8% ของมวลอิเล็กโทรดก็ตาม คาร์บอนแบล็คก็มีอิทธิพลอย่างมากต่อการนำไฟฟ้าบนพื้นที่ผิวจะส่งผลอย่างมากต่อโครงสร้าง รูพรุน และสภาพการนำไฟฟ้าอิเล็กโทรดในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด ส่วนผลการศึกษาของ McNally T.J. และคณะ, (2003) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเลือกใช้วัสดุกระตุ้นอย่างเหมาะสมในแบตเตอรี่ตะกั่วกรด พบว่าวัสดุกระตุ้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในแผ่นธาตุลบ ควรมีปริมาณคาร์บอนแบล็คเท่ากับโซเดียมลิเทียมโพลีเมอร์ ดังนั้นค่าความจุที่สูงขึ้นนั้นเมื่อมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนแบล็ค โซเดียมลิเทียมโพลีเมอร์เท่ากับ 6:6

ผลของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นที่มีผลต่อค่าความจุของขั้วลบในแบตเตอรี่ไฟฟ้า จากผลการวิเคราะห์ปริมาณประจุและจำนวนรอบของตะกั่วบริสุทธิ์ขนาด 1.25 g-cm^{-3} ในกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 20 ppm ของวัสดุกระตุ้นแต่ละชนิดให้ค่าความจุแตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบวัสดุกระตุ้นแต่ละชนิด พบว่าคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นส่งผลต่อค่าความจุของขั้วลบในแบตเตอรี่ไฟฟ้าสูงขึ้น เมื่อมีปริมาณคาร์บอนแบล็คเท่ากับโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต โดยที่ปริมาณคาร์บอนแบล็คและโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตจะต้องมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 6:6

จากการศึกษาผลของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นที่มีผลต่อค่าความจุของขั้วลบในแบตเตอรี่ไฟฟ้า ซึ่งวัสดุกระตุ้นเป็นส่วนผสมหลักของขั้วลบมีคุณสมบัติในการเพิ่มค่าความจุและจำนวนรอบต่อการใช้งานจะต้องประกอบด้วย แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate) โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต (Sodium lignosulfonate) และคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) ในการใช้งานจริงควรมีส่วนผสมอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 88:6:6 ตามลำดับ จึงจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการคายประจุ อายุการใช้งาน การยับยั้งการเกิดตะกั่วซัลเฟตบนพื้นผิวขั้วลบ และยังปรับปรุงการรับประจุของแบตเตอรี่

จากการศึกษาผลของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นที่มีผลต่อค่าความจุของขั้วลบในแบตเตอรี่ไฟฟ้า คาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นมีผลต่อค่าความจุของขั้วลบ ซึ่งคาร์บอนแบล็คมีด้วยกันหลายประเภทแต่ละประเภทมีคุณสมบัติที่ต่างกันทางผู้ทำการศึกษาเห็นควรที่จะนำคาร์บอนแบล็คแต่ละประเภทมาทำการเปรียบเทียบ โดยกำหนดค่าในการผสมวัสดุกระตุ้นด้วยเครื่องผสมความเร็วรอบสูง (Bench top mini speed mixers) ใช้ความเร็วรอบการผสม 500 รอบ/นาที และระยะเวลาการผสม 2 นาที เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติในการเพิ่มค่าความจุและจำนวนรอบต่อการใช้งานของแบตเตอรี่ไฟฟ้า

ข้อเสนอแนะ

การศึกษามูลของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นที่มีผลต่อค่าความจุของขั้วลบในแบตเตอรี่ไฟฟ้า ซึ่งทางผู้วิจัยได้เสนอแนะงานวิจัยครั้งต่อไปอันได้แก่ การศึกษามูลของคาร์บอนแบล็คต่อค่าความจุของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบการคายประจุต่อเนื่อง

กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้จัดทำรายงานการวิจัยการศึกษามูลของคาร์บอนแบล็คในวัสดุกระตุ้นที่มีผลต่อค่าความจุของขั้วลบในแบตเตอรี่ไฟฟ้าขอกราบขอบพระคุณผู้บริหารของทางมหาวิทยาลัยธนบุรีที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Atanassova, P., Blizanac B., Koehlert, K.C., Moeser, G.D., Oljaca, M., Sun, Y., Pierre, D., Sawrey, J.S. (2013). Carbon Blacks and Use in Electrodes for Lead Acid Batteries. *International Application Published Under The Patent Cooperation Treaty*, Publication No. WO 2013/096784 A1, 1-22.
- Abhishek. J., Subhas, C., Chalasani. (2015). The Role of Carbon in the Negative Plate of the Lead-Acid Battery. *J Energy S* 2015, 1, 15-21.
- Boden D.P. (2014). Expanders for lead-acid batteries. United States Patent. *Publication No.* 2014/8,637,183, 1-13

- Blecua, M., Fatas, E., Ocon, P., Valenciano, J., de la Fuente, F., Trinidad, F. (2017). Influences of Carbon Materials and Lignosulfonates in the Negative Active Material of Lead-Acid Batteries for Microhybrid Vehicles. *J Energy S* 2017, 11, 55-63.
- Hai-Yan, Hu., Ning, Xie., Chen, Wang. (2019). Enhancing the Performance of Motive Power Lead-Acid Batteries by High Surface Area Carbon Black Additives. *J Appl S* 2019, 186, 1-13.
- Hirai, N., Tabayashi, D., Shiota, M., Tanaka. (2004). In Situ Electrochemical Atomic force Microscopy of Lead Electrodes in Sulfuric Acid Solution with or Without Lignin During Anodic Oxidation and Cathodic Reduction. *J. Power S* 2004, 133, 32.
- McNally, T., Klang, J. (2003). Benefit of Increasing the Organic Expander Dosage on the High Temperature Performance of the Negative Electrode of Lead-Acid. *J Power S* 2003, 116, 47-52.
- Moseley, P.T., Nelson, R.F., Hollenkamp, A.F. (2006). The Role of Carbon in Valve Regulated Lead Acid Battery Technology. *J Power S* 2006, 157, 3-10.
- Meenakorn, S., Termsuksawad, P., Phiboomkulsumrit, S., and Chailapakul, O. (2010). Effects of Carbon Back and Mixing Parameters on Capacity of Expander. *PACCON2010*, 679-682.
- Xuesong, L., Guo, J. L., James, P., Ruihuan, G., Milan, K., Rachel, M. S., Denis, C. (2024). Effect of Carbon Blacks on Electrical Conduction and Conductive Binder Domain of Next-Generation Lithium-ion Batteries. *J Power S* 2024, 592, 1-15.

Received: May 19, 2025

Revised: Dec 3, 2025

Accepted: Dec 5, 2025

การประเมินการเลือกใช้กังหันน้ำสำหรับผลิตไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็น โดยเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองของกังหันเพลตันกับข้อมูลอ้างอิงของกังหันคาปลาน

EVALUATION OF TURBINE SELECTION FOR ELECTRICITY GENERATION FROM COOLING TOWER BLOWDOWN WATER : A COMPARISON BETWEEN EXPERIMENTAL DATA OF A PELTON TURBINE AND REFERENCE DATA OF A KAPLAN TURBINE

ธัญยาภรณ์ คงสินชัย ศุภประดิษฐ์ มาสงค์* ชัยพร สุภาหิตานุกูล ภาณุพงษ์ สามล

คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยปทุมธานี

Thanyaporn Kongsinchai, Supapradit Marsong*, Chaiporn Supahitanukul

Phanupong Samol

Faculty of Engineering and Technology, Pathumthani University

*Corresponding Author, E-mail: supapradit.m@ptu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเหมาะสมในการเลือกใช้กังหันน้ำผลิตไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็น (Cooling Tower Blowdown) โดยเปรียบเทียบระหว่างกังหันเพลตัน (Pelton Turbine) ซึ่งทำการทดลองจริงกับชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก และกังหันคาปลาน (Kaplan Turbine) ซึ่งอ้างอิงจากข้อมูลจากกราฟ Turbine Application Chart งานวิจัยได้ดำเนินการสร้างชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดความยาว 0.70 เมตร ความกว้าง 3.68 เมตร และความสูง 1.55 เมตร สำหรับทดสอบกังหันน้ำเพลตันขนาด 50 วัตต์ ภายใต้ช่วงอัตราการไหลของน้ำระหว่าง 500 ถึง 1,300 ลิตรต่อชั่วโมง การทดลองกังหันเพลตันดำเนินการภายใต้สภาวะที่จำลองอัตราการไหลและความสูงของน้ำใกล้เคียงกับระบบน้ำระบายของหอหล่อเย็นจริง โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงอัตราการไหล ผลการศึกษาพบว่า ภายใต้เงื่อนไขอัตราการไหล 25,590 ลิตรต่อชั่วโมง และความสูง 2 เมตร กังหันเพลตันสามารถใช้งานร่วมกับน้ำระบายของหอหล่อเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่ออัตราการไหลมีค่าสูงในระดับหนึ่ง และแม้ว่าความสูงจะไม่มาก (2 เมตร) แต่ก็สามารถผลิตไฟฟ้าได้ในระดับที่เหมาะสมกับโหลดขนาดเล็ก และกังหันเพลตันให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 321.02 วัตต์ ซึ่งเหมาะกับระบบที่มี Head สูง และอัตราการไหลต่ำ ส่วนกังหันคาปลาน ออกแบบมาสำหรับเงื่อนไข Head ต่ำและอัตราการไหลสูง ให้กำลังไฟฟ้า 125.37 วัตต์ หากใช้กังหันคาปลาน อาจต้องมีการปรับระบบเพื่อเพิ่มอัตราการไหล เมื่อเปรียบเทียบในแง่ของประสิทธิภาพพลังงานและความเหมาะสมในการติดตั้งในระบบจริง กังหันเพลตันแสดงถึงความเป็นไปได้ที่ดีกว่าสำหรับการประยุกต์ใช้กับน้ำระบายจากหอหล่อเย็น และยังสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ประมาณ 1,686 กิโลกรัมต่อปี

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็นโดยใช้กังหันน้ำเพลตันขนาดเล็กเป็นแนวทางที่มีความเป็นไปได้และยังเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ในระบบระบายน้ำของหอหล่อเย็น เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนเพื่อความยั่งยืนในระยะยาว

คำสำคัญ : ชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก, น้ำระบายของหอหล่อเย็น, กังหันน้ำ, หอหล่อเย็น

Abstract

This research aims to evaluate the suitability of using water turbines to generate electricity from cooling tower blowdown water by comparing a Pelton turbine experimentally tested using a small-scale power generation prototype with a Kaplan turbine, analyzed using data from a Turbine Application Chart. A small-scale power generation prototype was constructed with dimensions of 0.70 meters in length, 3.68 meters in width, and 1.55 meters in height to test a 50-watt Pelton turbine under flow rates ranging from 500 to 1,300 liters per hour. The experiments were conducted under conditions simulating real cooling tower blowdown water flow and head. Voltage, current, and power output were measured at each flow rate. The results showed that under a flow rate of 25,590 liters per hour and a head of 2 meters, the Pelton turbine operated efficiently with cooling tower blowdown water when the flow rate was sufficiently high. Although the head was relatively low (2 meters), the system could still generate an appropriate amount of electricity for small loads. The Pelton turbine achieved a maximum power output of 321.02 watts, making it suitable for systems with high head and low flow rate. In contrast, the Kaplan turbine, which is designed for low head and high flow conditions, produced 125.37 watts. Using a Kaplan turbine may require system modifications to increase the flow rate. When comparing energy efficiency and installation feasibility, the Pelton turbine showed greater potential for application with cooling tower blowdown water. Additionally, it could reduce carbon dioxide emissions by approximately 1,686 kilograms per year.

This study demonstrates that generating electricity from cooling tower blowdown using a small Pelton turbine is a feasible and promising approach. It offers an opportunity to recover energy from the cooling tower's discharge system, improve energy efficiency, and promote the use of renewable energy for long-term sustainability.

Keywords: Mall-Scale Power Generation Prototype, Cooling Tower Blowdown Water, Water Turbine, Cooling Tower

บทนำ

ในยุคปัจจุบัน การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนเป็นแนวทางสำคัญในการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจากแหล่งพลังงานที่มีอยู่ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมเป็นแนวทางหนึ่งที่มีความสนใจเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะการใช้ประโยชน์จากน้ำระบายของหอหล่อเย็น (*Cooling Tower Blowdown*) (Müller et al., 2024) ซึ่งเป็นน้ำส่วนเกินที่ถูกปล่อยออกจากระบบเพื่อควบคุมความเข้มข้นของสารละลาย และโดยทั่วไปไม่มีการนำกลับมาใช้ประโยชน์เพิ่มเติม น้ำระบายจากหอหล่อเย็นมีลักษณะเฉพาะที่น่าสนใจ เช่น มีแรงดันตกคร่อมและอัตราการไหลในระดับหนึ่ง ซึ่งหากนำมาศึกษาและออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก (Eshra et al., 2021) อย่างเหมาะสม ก็อาจสามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าเพิ่มเติมได้ โดยไม่กระทบต่อระบบหลักของโรงงาน อย่างไรก็ตาม การเลือกประเภทของกังหันน้ำที่เหมาะสมกับลักษณะของน้ำระบายดังกล่าว ถือเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณา ทั้งในด้านประสิทธิภาพพลังงาน การติดตั้ง และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการประเมิน

การเลือกใช้กังหันน้ำสำหรับผลิตไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็น อันยาภรณ์ คงสินชัย), จงจิตร หิรัญลาภ, ชัยพร สุภาหิตา นุกุล, สุเมธ สถิตบุญอนันต์, และ โจเซฟ เคดารี, 2024) โดยเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองของกังหันเพลตันกับข้อมูลอ้างอิงของกังหันคาปลาน ใช้ข้อมูลน้ำระบายจากหอหล่อเย็นของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมแห่งหนึ่งในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ปริมาณ 25,590 ลิตรต่อชั่วโมง (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 น้ำระบายจากหอหล่อเย็นของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมแห่งหนึ่งในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ปริมาณ 25,590 ลิตรต่อชั่วโมง

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การประเมินและเปรียบเทียบกังหันน้ำสองประเภท คือ กังหันเพลตัน (Pelton Turbine) ซึ่งเป็นกังหันที่เหมาะสมกับระบบที่มีแรงดันสูงและอัตราการไหลต่ำ กับกังหันคาปลาน (Kaplan Turbine) ที่นิยมใช้ในระบบที่มีแรงดันต่ำและอัตราการไหลสูง โดยการทดลองจริงจะดำเนินการกับกังหันเพลตันในชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (Samuel Tilahun et al., 2021) และนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับกังหันคาปลานโดยใช้ Turbine Application Chart (ภาพที่ 6) เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้งานจริงกับระบบน้ำระบายของหอหล่อเย็นในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า งานวิจัยฉบับนี้มีความโดดเด่นในด้านการประยุกต์ใช้จริง โดยได้ดำเนินการทดลองภายใต้สภาวะที่จำลองให้ใกล้เคียงกับระบบน้ำระบายของหอหล่อเย็นในอุตสาหกรรมอย่างสมจริง ผลการศึกษานี้จึงสะท้อนถึงศักยภาพของการพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจากน้ำระบายให้เป็นแนวทางพลังงานทดแทนที่สอดคล้องกับการส่งเสริมพลังงานสะอาดและการพัฒนาอุตสาหกรรมคาร์บอนต่ำอย่างยั่งยืน

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อประเมินการเลือกใช้กังหันน้ำสำหรับผลิตไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็น โดยเปรียบเทียบข้อมูล การทดลองของกังหันเพลตันกับข้อมูลอ้างอิงกังหันคาปลานจาก Turbine Application Chart

2. เพื่อออกแบบและทดสอบชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยกังหันเพลตันที่ใช้ประโยชน์จากน้ำระบายของหอหล่อเย็น

3. เพื่อเสนอแนวทางในการเลือกใช้กังหันน้ำที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็น 4. เพื่อคำนวณการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ขอบเขตของการวิจัย

1. ทดลองในชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันน้ำขนาดเล็ก ซึ่งมีความยาว 0.70 เมตร ความกว้าง 3.68 เมตร และความสูง 1.55 เมตร ดำเนินการภายใต้ช่วงอัตราการไหลของน้ำที่กำหนดไว้ระหว่าง 500 ถึง 1,300 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความสูง 2 เมตร (พงษ์ศิลป์ แก้วรัตน์ศรีโพธิ์, 2566)

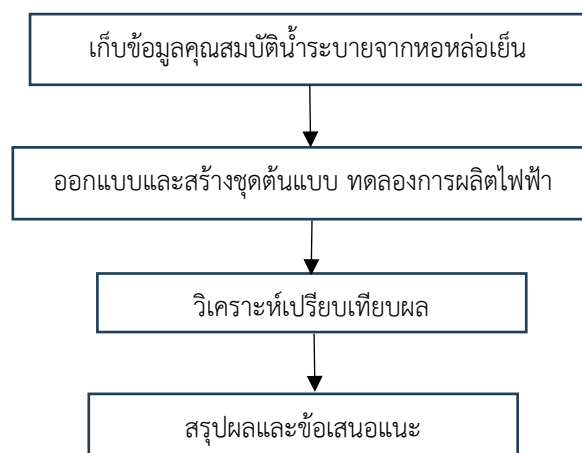
2. การวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาบนพื้นฐานของข้อมูลจากระบบน้ำระบายของหอหล่อเย็นในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ซึ่งมีอัตราการไหลของน้ำ 25,590 ลิตรต่อชั่วโมง

3. ดำเนินการทดลองจริงเฉพาะกับกังหันเพลตัน โดยจำลองเงื่อนไขการทำงานให้ใกล้เคียงกับระบบน้ำระบายจริง เพื่อเก็บข้อมูลด้านแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

4. ข้อมูลของกังหันคาปลานที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบจะอ้างอิงจากกราฟ Turbine Application Chart

กรอบแนวคิดการวิจัย (Research Framework)

กรอบแนวคิดการวิจัยของงานนี้มุ่งเน้นการประเมินความเหมาะสมของกังหันน้ำสองประเภท (เพลตันและคาปลาน) ภายใต้เงื่อนไขการไหลและความสูงของน้ำจากระบบหอหล่อเย็น โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูลคุณสมบัติน้ำระบาย ออกแบบและสร้างชุดต้นแบบ ทดลองการผลิตไฟฟ้า วิเคราะห์เปรียบเทียบผลกับข้อมูลอ้างอิงและคำนวณการลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อเสนอแนวทางพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กอย่างยั่งยืน (ภาพที่ 2)



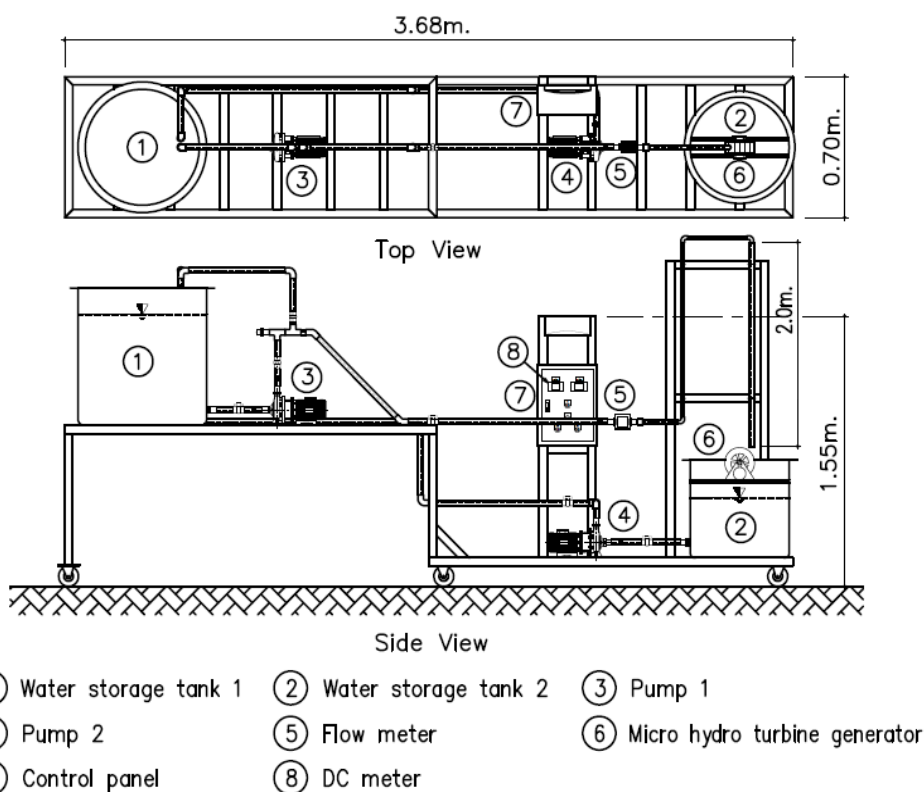
ภาพที่ 2 กรอบแนวคิดการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การศึกษาข้อมูลการออกแบบชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็น ออกแบบชุดต้นแบบโดยใช้โปรแกรม AutoCAD สร้างและติดตั้งชุดต้นแบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็นขนาดเล็ก และการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ดังนี้

1. ศึกษาข้อมูลการออกแบบชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็น เก็บรวบรวมคุณสมบัติของน้ำ Cooling Blowdown Water เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหล ความสูง เป็นต้น จากนั้นดำเนินการออกแบบชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็นขนาดเล็ก โดยใช้กังหันน้ำแบบเพลตัน (Pelton Turbine) ซึ่งเหมาะสมกับอัตราการไหลต่ำ แต่มีแรงดันสูง โดยคำนวณและกำหนดขนาดของอุปกรณ์ให้สอดคล้องกับระบบระบายน้ำของหอหล่อเย็น

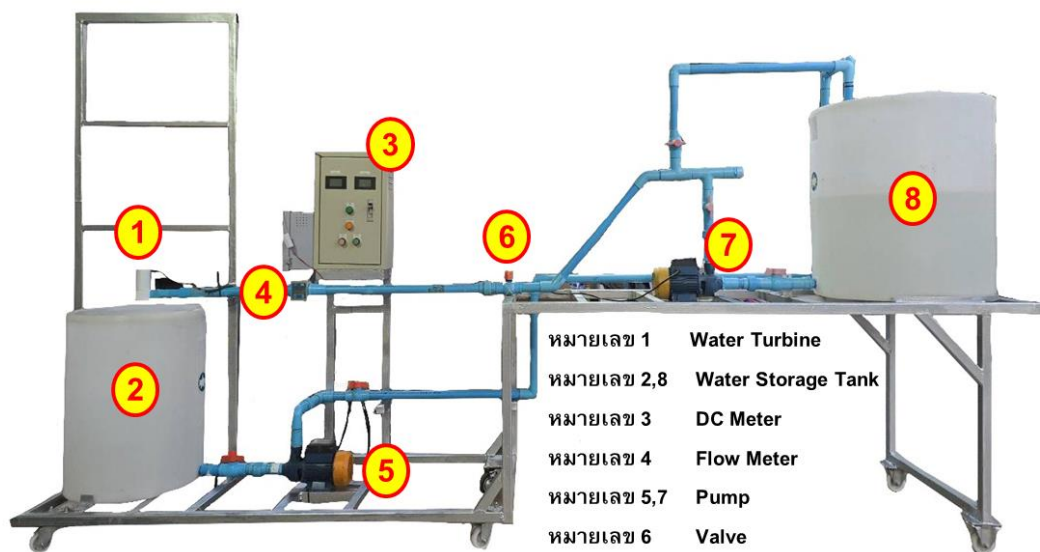
2. ออกแบบชุดต้นแบบโดยใช้โปรแกรม AutoCAD เพื่อใช้ในการชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าดังภาพที่ 3 (คมสัน วงศ์วีรพันธ์ ,2548)



ภาพที่ 3 การออกแบบชุดต้นแบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็น

โดยใช้โปรแกรม AutoCAD

3. การสร้างและติดตั้งชุดต้นแบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็นขนาดเล็ก สำหรับใช้ในการทดลอง มีขนาดความยาว 0.70 เมตร ความกว้าง 3.68 เมตร และความสูง 1.55 เมตร โดยใช้กังหันน้ำเพลตันขนาด 50 วัตต์ เป็นกลไกหลักในการผลิตไฟฟ้า ระบบประกอบด้วยถังเก็บน้ำ ท่อส่งน้ำ กังหันเพลตัน เครื่องวัดอัตราการไหล และระบบควบคุมการวัดผลการผลิตไฟฟ้า ตามภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ชุดต้นแบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็นด้วยกังหันน้ำ

ชุดต้นแบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็นตามภาพที่ 4 ประกอบด้วยวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง ดังนี้

3.1 ชุดกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าเพลตันขนาดเล็ก หมายเลข 1 ขนาด 50 วัตต์ ตามภาพที่ 5

3.2 ถังเก็บน้ำ ขนาดความจุ 200 ลิตร จำนวน 2 ใบ หมายเลข 2 และ 8 ใช้สำหรับเก็บน้ำที่ใช้ในการทดสอบ

3.3 เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า (DC Meter) หมายเลข 3 สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันน้ำ

3.4 ชุดวัดอัตราการไหลแบบดิจิตอล (Flow meter) หมายเลข 4 ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำในระบบ โดยสามารถวัดอัตราการไหลได้ในช่วง 0 ถึง 120 ลิตรต่อวินาที เพื่อความแม่นยำในการควบคุมการทดสอบปรับอัตราการไหลโดยใช้วาล์วปรับอัตราการไหล

3.5 ปั๊มน้ำชนิดหอยโข่ง จำนวน 2 เครื่อง หมายเลข 5 และ 7 โดยมีอัตราการไหลอยู่ในช่วง 5 ถึง 40 ลิตรต่อวินาที ทำหน้าที่สูบน้ำเข้าสู่ระบบและควบคุมการไหลของน้ำด้วย



ภาพที่ 5 กังหันน้ำเพลตันที่ใช้ในการทดสอบ

4. การทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ทำการทดลองโดยใช้น้ำจำลองที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำระบายของหอหล่อเย็น ทดสอบการทำงานของระบบภายใต้อัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกันในช่วง 500 ถึง 1,300 ลิตรต่อชั่วโมง ความสูง 2 เมตร โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันน้ำเพลตัน ในแต่ละอัตราการไหล แล้วนำมาประเมินศักยภาพของระบบในขนาดจริง โดยใช้ข้อมูลจากระบบระบายน้ำของหอหล่อเย็นที่มีอัตราการไหล 25,590 ลิตรต่อชั่วโมง เพื่อนำไปคำนวณการผลิตไฟฟ้าในระดับใช้งานจริง โดยอ้างอิงจากผลการทดลองที่ได้จากชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยกังหันเพลตัน มีขั้นตอนการทดสอบและเก็บข้อมูลดังนี้

4.1 ติดตั้งกังหันน้ำเพลตัน ในชุดต้นแบบสำหรับผลิตไฟฟ้า

4.2 นำน้ำที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำระบายจากหอหล่อเย็นมาทดลองในชุดต้นแบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็นไฟฟ้า โดยเติมน้ำลงในถังเก็บน้ำ (หมายเลข 8) เพื่อหมุนเวียนน้ำในระบบ

4.3 ทำการทดลองที่อัตราการไหล 500 ถึง 1,300 ลิตรต่อชั่วโมง โดยเพิ่มอัตราการไหลครั้งละ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ควบคุมโดยการปรับวาล์ว (หมายเลข 6)

4.4 ทำการบันทึกข้อมูล กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ทุก ๆ 20 นาที จำนวน 6 ครั้ง

4.5 คำนวณการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

ผลการดำเนินการ

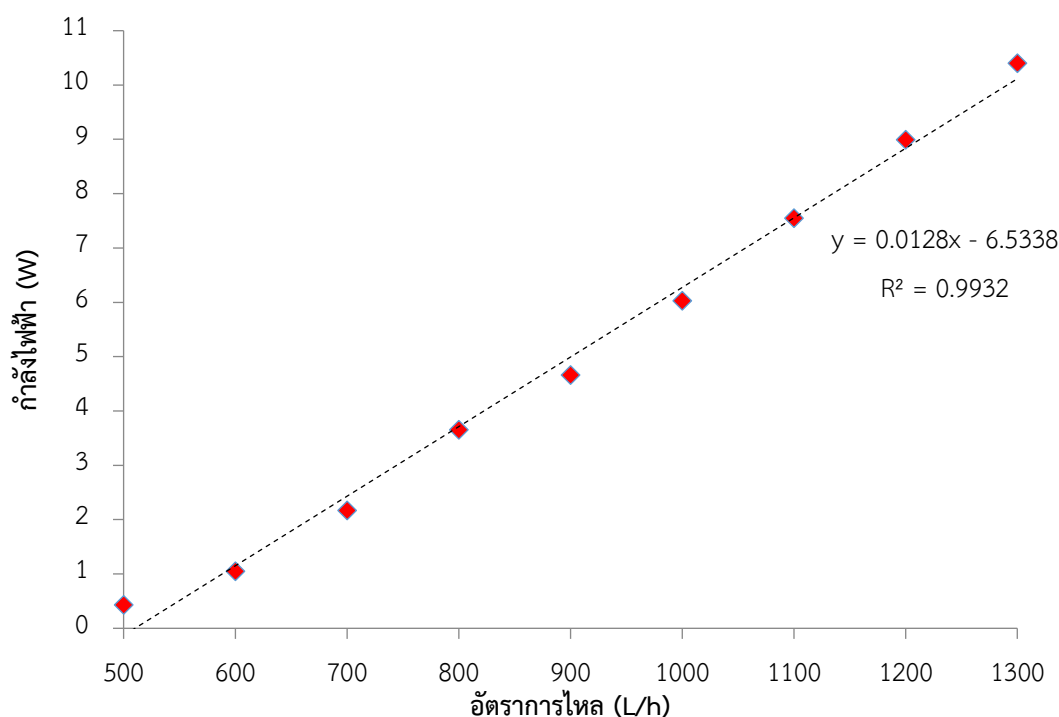
1. ผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำ

ตารางแสดงผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำ โดยใช้กังหันเพลตัน ภายใต้ความสูง 2 เมตร (Head) โดยเปลี่ยน อัตราการไหลของน้ำ ผลการทดสอบสามารถสรุปและแสดงได้ตามรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าในชุดต้นแบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็นด้วยกังหันเพลตันที่ความสูง 2 เมตร

ความสูง (เมตร)	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
2	500	8.52	0.05	0.43
	600	9.50	0.11	1.05
	700	10.32	0.21	2.17
	800	11.42	0.32	3.65
	900	12.59	0.37	4.66
	1000	13.40	0.45	6.03
	1100	14.51	0.52	7.55
	1200	15.50	0.58	8.99
	1300	16.00	0.65	10.40

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 1 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันน้ำเพลตัน โดยใช้ น้ำที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ น้ำระบายของหอหล่อเย็นจากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม ที่มีอัตราการไหลตั้งแต่ 500 – 1,300 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำ ที่อัตราการไหล 500 ลิตร/ชั่วโมง ได้แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ 8.52 โวลต์, 0.05 แอมแปร์ และ 0.43 วัตต์ ตามลำดับ และที่อัตราการไหล 1,300 ลิตร/ชั่วโมง ได้แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 16 โวลต์, 0.65 แอมแปร์ และ 10.40 วัตต์ ตามลำดับ เมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล กับ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ได้ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับกำลังไฟฟ้า

ภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Flow rate) กับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (Power) ของกังหัน น้ำ ในช่วงอัตราการไหล 500 ถึง 1,300 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามอัตราการไหลของน้ำ โดยที่ อัตราการไหล 500 ลิตรต่อชั่วโมง ให้กำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ 0.43 วัตต์ และเพิ่มขึ้นเป็นสูงสุดที่ 10.40 วัตต์ ที่อัตราการไหล 1,300 ลิตรต่อชั่วโมง แสดงว่าอัตราการไหลของน้ำส่งผลต่อกำลังไฟฟ้า ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเชิงเส้นตรง $y = 0.0128x - 6.5338$ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 = 0.9932$

เมื่อนำกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงจากการทดลองมาเทียบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำและความคลาดเคลื่อนของชุดต้นแบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็น แสดงได้ตามรายละเอียดใน ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงจากทดลองและกำลังไฟฟ้าจากการจำลอง

ความสูง (m)	อัตราการไหล (L/h)	กำลังไฟฟ้า (W) (ทดลอง)	กำลังไฟฟ้า (W) (จำลอง)	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน
2	500	0.43	-0.13	-131.12
	600	1.05	1.15	9.16
	700	2.17	2.43	11.81
	800	3.65	3.71	1.54
	900	4.79	4.99	4.10
	1000	6.03	6.27	3.92
	1100	7.55	7.55	0
	1200	8.99	8.83	-1.82
	1300	10.40	10.11	-2.83

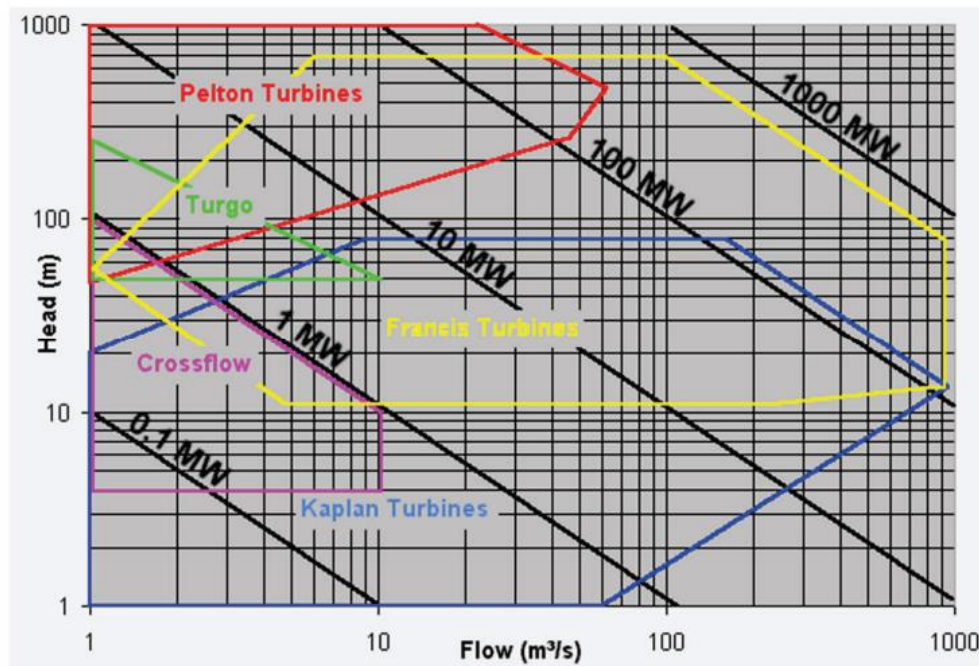
จากการทดลองผลิตไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็นด้วย Pelton Turbine โดยใช้ความสูงของน้ำ 2 เมตร (Head) และเปลี่ยนแปลง อัตราการไหลของน้ำ (Flowrate) หน่วยเป็นลิตรต่อชั่วโมง (L/h) เพื่อดูผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ หน่วยเป็นวัตต์ (W) ในช่วง flow rate 500-700 L/h ค่า Percent Error เฉลี่ยสูงกว่า 5% เพราะน้ำไหลไม่สม่ำเสมอ และในช่วง flow rate 800-1300 L/h ค่า Percent Error เฉลี่ยต่ำกว่า 5% แสดงว่าการทดลองมีความแม่นยำสูงในช่วงการไหลที่มาก แต่มีความคลาดเคลื่อนสูงที่ flow rate ต่ำกว่า 700 L/h เนื่องจากการไหลไม่สม่ำเสมอและผลกระทบจากแรงเสียดทานของท่อ

วิเคราะห์พลังงานไฟฟ้า (P) ที่ผลิตได้จากน้ำระบายของหอหล่อเย็น มีอัตราการไหล 25,590 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้ผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าของ Pelton Turbine ซึ่งได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (Q) กับกำลังไฟฟ้า (P) คือ

$$P = 0.0128Q - 6.5338 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการ} \quad P &= 0.0128 (25590) - 6.5338 \text{ W} \\ &= 321.02 \text{ W} \end{aligned}$$

2. พิจารณากังหันน้ำที่เหมาะสมกับความสูง 2 เมตร (Head) จาก Turbine Application Chart (ภาพที่ 7) เพื่อประเมินกังหันน้ำที่จะนำมาใช้กับระบบน้ำระบายของหอหล่อเย็นจากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม พบว่า เป็นกังหันชนิดคาปแลน (Kaplan Turbine) จึงนำมาคำนวณเพื่อประเมินการผลิตไฟฟ้า



ภาพที่ 7 Turbine Application Chart

(ที่มา: คู่มือการพัฒนา และการลงทุนผลิตพลังงานทดแทนชุดที่ 3, 2554)

จากกราฟ อธิบายได้ดังนี้ สำหรับ Head 2 เมตร จะเหมาะกับกังหันแบบคาปแลน โดยที่

1. พื้นที่การใช้งานของ Kaplan Turbine ใช้สำหรับ "น้ำไหลมาก แต่ความสูงน้ำน้อย"

แกน X = อัตราการไหล (Flow rate) หน่วย m^3/s ตั้งแต่ประมาณ $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ถึง $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$

แกน Y = ความสูงน้ำ (Head) หน่วย m ตั้งแต่ น้อยกว่า 1 m ถึงประมาณ 30 m เท่านั้น

เส้นทแยง = กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (MW = เมกะวัตต์)

2. กำลังไฟฟ้าที่ได้ (Power Output) จะขึ้นอยู่กับ Flow และ Head ตามเส้นกำลังไฟฟ้า กล่าวคือ

กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามทั้ง "Flow" และ "Head" แบบเป็นสัดส่วน

3. Kaplan ต้องการ Flow เยอะ ต้องการ Head ต่ำ ได้กำลังไฟฟ้า ตั้งแต่ 0.1 MW จนถึงหลายร้อย MW เหมาะกับ แม่น้ำใหญ่, เขื่อน run-of-river, hydro plant แบบน้ำไม่สูง

ผลการประเมินการผลิตไฟฟ้าจาก Kaplan Turbine จากทฤษฎี สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = \eta \rho g H Q \quad (2)$$

เมื่อ

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร ($1000 \text{ kg}/\text{m}^3$)

η คือ ประสิทธิภาพของกังหัน มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (90 %)

Q คือ อัตราการไหล มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ($0.0071 \text{ m}^3/\text{s}$)

G คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าประมาณ 9.81 เมตรต่อวินาที (m/s)

H

คือ ความสูง เมื่อวัดจากจุดอ้างอิงมีหน่วยเป็นเมตร (2 m)

แทนค่าลงในสมการ

$$P = 0.9 \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s} \times 2 \text{ m} \times 0.0071 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P = 125.37 \text{ W}$$

ผลวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็นจากกังหันเพลตันและกังหันคาปลาน แสดงได้ตามรายละเอียดในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็นจากกังหันเพลตันและกังหันคาปลาน

พารามิเตอร์	กังหันเพลตัน	กังหันคาปลาน
อัตราการไหล (L/h)	25,590	
ความสูง (m)	2	
กำลังไฟฟ้า (W)	321.02	125.37

จากตารางที่ 3 เปรียบเทียบการผลิตไฟฟ้าของกังหันน้ำ 2 ประเภท ภายใต้เงื่อนไขอัตราการไหล 25,590 ลิตรต่อชั่วโมง และความสูง 2 เมตร พบว่ากังหันเพลตันสามารถใช้งานร่วมกับน้ำระบายของหอหล่อเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่ออัตราการไหลมีค่าสูงในระดับหนึ่ง และแม้ว่าความสูงจะไม่มาก (2 เมตร) แต่ก็สามารถผลิตไฟฟ้าได้ในระดับที่เหมาะสมกับโหลดขนาดเล็ก และกังหันเพลตันสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 321.02 วัตต์ ซึ่งแสดงถึงความเหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าที่มี เฮด (Head) สูงและอัตราการไหลของน้ำต่ำ ในทางกลับกัน กังหันคาปลาน (Kaplan Turbine) ถูกออกแบบมาให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไขที่มีเฮด (Head) ต่ำและอัตราการไหลสูง โดยให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 125.37 วัตต์ ทั้งนี้ หากนำกังหันคาปลานมาใช้ในระบบดังกล่าว อาจจำเป็นต้องปรับปรุงระบบให้สามารถเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการทำงานที่เหมาะสมยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบในแง่ของประสิทธิภาพพลังงานและความเหมาะสมในการติดตั้งในระบบจริง กังหันเพลตันจึงแสดงความเป็นไปได้ที่ดีกว่าสำหรับการประยุกต์ใช้น้ำระบายจากหอหล่อเย็น ทั้งนี้การศึกษายังเสนอแนะแนวทางในการออกแบบระบบกังหันน้ำขนาดเล็กที่เหมาะสมกับเงื่อนไขเฉพาะของแหล่งน้ำอุตสาหกรรม

3. การวิเคราะห์การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

ระบบระบายน้ำของหอหล่อเย็นมีการระบายน้ำอย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันน้ำเพลตันสามารถดำเนินการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ตลอดทั้งวัน โดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละวันสามารถคำนวณได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : แปลงกำลังไฟฟ้าเป็นพลังงานต่อชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้าจากกังหันเพลตัน} &= 321.02 \text{ วัตต์} \\ \text{พลังงานต่อวัน} &= 321.02 \text{ W} \times 24 \text{ h} \\ &= 7.70 \text{ kWh/day} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 2 : ค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงฟอสซิลมีค่าแตกต่างกันตามประเภทของเชื้อเพลิง โดยถ่านหินมีค่าการปล่อยประมาณ 1.0 kg CO₂/kWh และก๊าซธรรมชาติประมาณ 0.4–0.5 kg CO₂/kWh สำหรับประเทศไทย ค่าการปล่อยโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.5–0.6 kg CO₂/kWh ดังนั้น ในการวิเคราะห์นี้จึงเลือกใช้ค่าเฉลี่ยที่ 0.6 kg CO₂/kWh (Global Economic Insights, 2024) ค่าการลดการปล่อยก๊าซ CO₂ จากการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบกังหันน้ำสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{การลดค่า CO}_2 \text{ ต่อวัน} &= 7.70 \times 0.6 && \text{kg CO}_2/\text{day} \\
 &= 4.62 && \text{kg CO}_2/\text{day} \\
 &= 1,686 && \text{kg CO}_2/\text{year}
 \end{aligned}$$

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Feasibility)

การประเมินเบื้องต้นด้านเศรษฐศาสตร์พลังงานพบว่า หากระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้เฉลี่ย 7.7 kWh/day จะประหยัดค่าไฟฟ้าได้ประมาณ 10,000–12,000 บาทต่อปี เมื่อเทียบกับการลงทุนชุดต้นแบบมูลค่าประมาณ 60,000–70,000 บาท มีระยะเวลาคืนทุนราว 5–6 ปี ซึ่งถือว่ามีความคุ้มค่าในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะในระบบที่ต้องมีการระบายน้ำอย่างต่อเนื่อง จึงเหมาะต่อการนำไปขยายผลในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางถึงขนาดใหญ่

สรุปผลและการอภิปราย

งานวิจัยฉบับนี้มีเป้าหมายในการศึกษาการประเมินการเลือกใช้กังหันน้ำสำหรับผลิตไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็น โดยเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองของกังหันเพลตันกับข้อมูลอ้างอิงของกังหันคาปลาน โดยใช้พลังงานจากการไหลของน้ำในการหมุนกังหันน้ำชนิดเพลตัน เพื่อออกแบบและพัฒนาชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ผลการทดลองจากชุดต้นแบบขนาดเล็กแสดงให้เห็นว่า ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอัตราการไหลของน้ำ โดยกังหันเพลตันสามารถผลิตได้สูงสุดเฉลี่ย 10.40 วัตต์ ที่อัตราการไหล 1,300 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อขยายผลจากชุดต้นแบบไปสู่ระบบจริงที่มีอัตราการไหล 25,590 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดประมาณ 321.02 วัตต์ และเมื่อวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าจากกังหันคาปลานที่เหมาะสมกับความสูง 2 เมตร โดยอ้างอิง Turbine Application Chart พบว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้อยู่ที่ 125.37 วัตต์ เมื่อเปรียบเทียบในแง่ของประสิทธิภาพพลังงานและความเหมาะสมในการติดตั้งในระบบจริง กังหันเพลตันจึงแสดงความเป็นไปได้ที่ดีกว่าสำหรับการประยุกต์ใช้กับน้ำระบายจากหอหล่อเย็น นอกจากนี้ ระบบยังมีศักยภาพในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 1,686 กิโลกรัมต่อปี

จากผลการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็นโดยประเมินการใช้กังหันน้ำเพลตันและกังหันน้ำคาปลาน เป็นแนวทางที่มีความเป็นไปได้ อีกทั้งยังมีศักยภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ ช่วยลดภาระด้านพลังงาน สนับสนุนการใช้พลังงานหมุนเวียน และส่งเสริมความยั่งยืนของระบบระบายน้ำของหอหล่อเย็นในระยะยาว นอกจากนี้การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควบคุมอัตโนมัติ เช่น IoT และ Sensor Monitoring จะช่วยให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากน้ำระบายทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยสามารถตรวจวัดอัตราการไหล ความดัน และกำลังไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ พร้อมปรับค่าการทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อมีความแปรปรวน เทคโนโลยีดังกล่าวยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของระบบ ตลอดจนสนับสนุนการพัฒนาไปสู่ระบบ Smart Micro Hydro System ที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมยุคใหม่

ข้อเสนอแนะ

ควรทดสอบกับระบบระบายน้ำจากหอหล่อเย็นในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมภายใต้เงื่อนไขจริง เพื่อประเมินผลกระทบจากค่าสารแขวนลอย อุณหภูมิในน้ำ และความสูง เป็นต้น ในเชิงนโยบาย ภาครัฐควรส่งเสริมการนำเทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจากน้ำระบายมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม ผ่านมาตรการสนับสนุนด้านภาษี เงินอุดหนุนเบี้ยต่ำ หรือโครงการ ESCO เพื่อเพิ่มแรงจูงใจให้ภาคเอกชนลงทุนในระบบพลังงานสะอาด รวมทั้งบูรณาการแนวทางการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า (Circular Economy) สู่เป้าหมายอุตสาหกรรมคาร์บอนต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.ศุภประดิษฐ์ มาสงค์ และ ดร.ชัยพร สุภาพิตานุกุล ที่ช่วยแนะนำ ให้ความรู้ สนับสนุนข้อมูล ประกอบการวิจัย ตลอดจนคำแนะนำอื่น ๆ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ทีมช่าง บริษัท เอโอเอส เอ็นจิเนียริง จำกัด (ประเทศไทย) ที่ช่วยจัดหาอุปกรณ์ สร้างชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้า และสนับสนุนด้วยดีเสมอมา ตลอดจนบุคคลท่านอื่นที่ไม่ได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2554). *คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทนชุดที่ 3* [ออนไลน์]. <https://www.google.co.th/url?>
- คมสัน วงศ์วีรจันทร์. (2548). *กลศาสตร์ของไหล* (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์โอ.เอส.พรินต์ติ้งเฮาส์.
- ธัญยาภรณ์ คงสินชัย, จงจิตร หิรัญลาภ, ชัยพร สุภาพิตานุกุล, สุเมธ สถิตบุญญนันต์, & โจเซฟ เคดารี. (2024). การศึกษาความเป็นไปในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำระบายของหอหล่อเย็น. *Frontiers in Engineering Innovation Research*, 22(2), 47–58.
- พงษ์ศิลป์ แก้วรัตนศรีโพธิ์. (2566). การจำลองการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำโดยใช้โปรแกรมแลปวิว. *Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST)*, Vol 21(2). 117-125
- Eshra, N. M., Zobaa, A. F., & Abdel Aleem, S. H. E. (2021). Assessment of mini and micro hydropower potential in Egypt: Multi-criteria analysis. *Energy Reports*, 7, 81–94. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.165>
- Global Economic Insights. (2024). Carbon dioxide emission per electricity generation – Thailand. CEIC Data. Retrieved March 26, 2025, from <https://www.ceicdata.com/en/thailand/carbon-dioxide-emissions-statistics/carbon-dioxide-emission-per-electricity-generation>
- Müller, S. I., Chapanova, G., Diekow, T., Kaiser, C., Hamelink, L., Hitsov, I. P., Wyseure, L., Moed, D. H., Palmowski, L., & Wintgens, T. (2024). Comparison of cooling tower blowdown and enhanced make up water treatment to minimize cooling water footprint. *Journal of Environmental Management*, 367, 121949. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121949>
- Samuel, T., Velmurugan, P., Mebratu, T., Alelign, K., & Senthil, K. S. (2021). Analytical investigation of Pelton turbine for mini hydro power: For the case of selected site in Ethiopia. *Renewable Energy*, 46, 7364–7368.

Translated Thai References

- Alternative Energy Development and Conservation Bureau, Ministry of Energy. (2011). *Guidelines for the Development and Investment in Renewable Energy Production, Series 3*. [online]. <https://www.google.co.th/url?>
- Kaewrattanasriptho P. (2022). *Simulation of the Generating Electricity from Water Turbines Using the LabVIEW*. *Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST)*, Vol 21(2). 117-125
- Khomsan Wongweerakhan. (2005). *Fluid Mechanics (1st ed.)*. Bangkok: O.S. Printing House.
- Kongsinchai T, Hirunlabh J, Supahitanukul C, Sathibunanan S, and Khedari J. (2024). Investigation of using blowdown of cooling tower to generate electricity. *Frontiers in Engineering Innovation Research*, 22(2), 47–58.

Received: Jun 9, 2025

Revised: Dec 24, 2025

Accepted: Dec 26, 2025

การหาส่วนผสมดินปลูกที่เหมาะสมต่อคุณสมบัติของดินปลูกและการเจริญเติบโตของแตงโมสายพันธุ์ ตอปีโดลูกผสมควีนเลดี้ F1 ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม

OPTIMIZATION OF GROWING MEDIA COMPOSITION FOR SOIL PROPERTIES AND GROWTH OF TORPEDO HYBRID QUEEN LADY F1 WATERMELON USING MIXTURE DESIGN EXPERIMENTAL METHOD

ผกาภาส แท่นแก้ว รณฤทธิ์ ชิงภูเขียว* ศิรวัดน์ สุรโชติเวศย์

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

Pakamas Thaenkaew, Ronnarit Khuengphukhiao,* Sirawat Surachotivet

¹Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology

*Corresponding author: Email: ronna_rit@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาส่วนผสมของวัสดุปลูกที่เหมาะสมต่อคุณสมบัติทางเคมีของดินปลูกและอัตราการเจริญเติบโตของแตงโมสายพันธุ์ตอปีโดลูกผสมควีนเลดี้ F1 โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design) โดยวัสดุปลูกที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย ขุยมะพร้าว กาบมะพร้าว มูลวัว แกลบดำ และดินปลูกเพื่อการค้า ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันตามแผนการทดลองแบบส่วนผสม แล้วทำการวิเคราะห์ผลของอัตราการเจริญเติบโตของแตงโมสายพันธุ์ตอปีโดลูกผสมควีนเลดี้ F1 โดยวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และต้นทุนต่อถุง ผลการศึกษาพบว่า ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ ขุยมะพร้าวร้อยละ 15 กาบมะพร้าวร้อยละ 15 มูลวัวร้อยละ 20 แกลบดำร้อยละ 15.54 และดินปลูกเพื่อการค้าร้อยละ 34.47 ซึ่งทำให้อัตราการเจริญเติบโตของแตงโมสายพันธุ์ตอปีโดลูกผสมควีนเลดี้ F1 สูงขึ้นจาก 76.97 อัตราการเจริญเติบโตของของจำนวนใบร้อยละ 21.30 อัตราการเจริญเติบโตของของขนาดลำต้นร้อยละ 0.732 ต้นทุนถุงละ 12.29 บาท ค่าการนำไฟฟ้า (EC) 2.19 (dS/m) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 7.2

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม, อัตราการเจริญเติบโตของแตงโม, สมบัติทางเคมีของดินปลูก

Abstract

This study aimed to determine the optimal composition of growing media that enhances the chemical properties of the growing substrate and the growth performance of Torpedo Hybrid Queen Lady F1 watermelon using a mixture design experimental approach. The growing media materials evaluated in this study consisted of coconut coir, coconut husk, cow manure, carbonized rice husk, and commercial growing soil which were combined in different proportions according to the mixture design matrix. The growth responses analyzed included the growth rate of plant height leaf number, and stem diameter. In addition, the physicochemical properties of the growing media were assessed, including electrical conductivity (EC) pH and cost per planting bag. The results indicated that the optimal growing media composition comprised 15 percentage coconut coir, 15 percentage coconut husk 20 percentage cow manure 15.54 percentage carbonized rice husk and 34.47percentage commercial growing soil. This mixture resulted in a plant height growth rate of 76.97

Keywords: Mixture Design Experimental Methodology, Watermelon Growth Rate, Chemical Properties of Growing

บทนำ

แตงโม (*Citrullus lanatus* (Thunb.)) เป็นพืชในวงศ์ Cucurbitaceae ซึ่งอยู่ในตระกูลเดียวกับแคนตาลูป ฟักทอง และแตงกวา แตงโมมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ซึ่งอุดมไปด้วยสารอาหารสำคัญหลายชนิด ได้แก่ ไลโคปีน (Lycopene) วิตามินเอ วิตามินซี ซิทูลิน (Citrulline) โพแทสเซียม วิตามินบี และเส้นใยอาหาร นอกจากนี้ แตงโมยังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เกษตรกรทำการเพาะปลูกแตงโมใน 63 จังหวัด มีพื้นที่เพาะปลูกรวม 61,859 ไร่ สามารถสร้างผลผลิตได้ 93,654,527 กิโลกรัม ซึ่งสร้างรายได้เป็นจำนวนมากให้แก่เกษตรกรไทย (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2024) ซึ่งในการปลูกแตงโมขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณภาพของวัสดุปลูกและดินที่เหมาะสม การใช้วัสดุปลูกที่เหมาะสมจะมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการปลูกแตงเทศ วัสดุปลูกที่นิยมใช้ได้แก่ ขุยมะพร้าว หยาบหยาบ กากกะหล่ำ ถ่านแกลบ และแกลบเป็นต้น มีรายงานว่าเมื่อนำขุยมะพร้าวมาผสมกับวัสดุปลูกทำให้การเจริญเติบโตดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุปลูกที่ประกอบด้วยดินร่วนหรือทรายเพียงอย่างเดียว ซึ่งวัสดุปลูกที่มีขุยมะพร้าวเป็นส่วนผสม ทำให้พืชมีการ เจริญเติบโตดี เนื่องจากมีการเก็บความชื้นและมีการระบายอากาศได้ดีขึ้น วิทยา สุริยาภณานนท์ (1980) รายงานว่า แกลบดำ นำมาเป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อช่วยเพิ่มความร่วนซุย เพิ่มแร่ธาตุ ช่วยให้ ดินอุ้มน้ำได้ วัสดุในการเพาะปลูกจึงมีความสำคัญและจำเป็นต่อการเพาะปลูกพืชอย่างมาก ควรเป็นวัสดุที่มีคุณภาพ และมีธาตุอาหารที่พืชต้องการทำให้พืชปลูกเจริญเติบโตได้ดี การใช้ขุยมะพร้าวปลูกแตงเทศสายพันธุ์กรีนเน็ต 1778 (green net 1778) ในระบบปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินให้ผลผลิตดีที่สุด เนื่องจากขุยมะพร้าวมีการอุ้มน้ำ ระบายน้ำ และ ระบายอากาศได้ดีกว่าพีทมอส ทำให้แตงเทศดูดธาตุอาหารไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (นภาพร จิตต์ศรัทธา และวัชรวิทย์ รัตมี, 2019) นอกจากนี้ สมิตรา สุปินราช และคณะ (2016) กล่าวว่า การใช้วัสดุปลูก คือ แกลบดิบ แกลบดำ ดินร่วน ปุ๋ยคอก และปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 อัตราส่วน 3 : 1 : 1 : 0.50 : 0.25 ทำให้ความสูงต้น ความกว้าง และทรงพุ่มดีที่สุด สมิตรา สุปินราช และศิร สุปินราช (2018) กล่าวว่า การใช้วัสดุปลูกได้แก่ ขุยมะพร้าว ปุ๋ยคอก ทราย ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 อัตรา 1 : 2 : 1 : 1 : 0.25 มีผลต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงต้น ความกว้างทรงพุ่มจำนวนใบ ความกว้างใบ ความยาวใบ น้ำหนักสด และความยาวรากดีที่สุด

วัสดุปลูกที่ใช้นิยมใช้กันทั่วไป เช่น พีทมอส ขุยมะพร้าว ทราย และวัสดุอินทรีย์หมัก วัสดุปลูกยังคงมีข้อจำกัดสำคัญในด้านความยั่งยืน คุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ และต้นทุนในการจัดการการกำหนดสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปลูกแต่ละชนิดด้วยวิธีการปรับเปลี่ยนตัวแปรทีละปัจจัย (one-factor-at-a-time) จึงยังไม่สามารถอธิบายผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ได้อย่างครบถ้วน อีกทั้งยังต้องใช้จำนวนการทดลองมากและสิ้นเปลืองทรัพยากร (Fukuda et al., 2018) การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Design of Experiments: DOE) โดยเฉพาะการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลของตัวแปรหลายตัวพร้อมกันผลลัพธ์ของระบบขึ้นอยู่กับสัดส่วนสัมพัทธ์ขององค์ประกอบแต่ละชนิดที่รวมกันเป็นร้อยละ 100 ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ทั้งผลเชิงเดี่ยวและผลเชิงปฏิสัมพันธ์ขององค์ประกอบในสูตรได้อย่างเป็นระบบและลดจำนวนการทดลองลงได้อย่างมีนัยสำคัญ (Romo et al., 2024) แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุปลูกแต่การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับพืชแตงโมโดยเฉพาะยังมีจำนวนจำกัด โดยเฉพาะในสายพันธุ์ลูกผสมเชิงการค้า เช่น Torpedo Hybrid Queen Lady F1 ซึ่งมีความต้องการน้ำและธาตุอาหารในระดับสูง และมีความไวต่อสภาพแวดล้อมของระบบราก การเลือกสูตรวัสดุปลูกที่ไม่เหมาะสมอาจส่งผลกระทบต่อ การพัฒนาระบบราก การดูดใช้ธาตุอาหาร และอัตราการเจริญเติบโตของพืชในระยะเริ่มต้น (Nurin et al., 2024) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาหาส่วนผสมของวัสดุปลูกที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแตงโมสายพันธุ์ตอปีโดลูกผสมควีนเลดี้ F1 โดยการใช้วัสดุปลูกอินทรีย์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ขุยมะพร้าว กาบมะพร้าว มูลวัว แกลบดำ และดินปลูกเพื่อการค้า และมีอัตราส่วนตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม โดยใช้ผลของอัตราการเจริญเติบโตของความสูงของต้น อัตราการเจริญเติบโตของจำนวนใบ อัตราการเจริญเติบโตของขนาดลำต้น ในส่วนของการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุปลูกประกอบด้วย ค่า EC ค่า pH และต้นทุนต่อถุง เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่เหมาะสมตามผลที่ต้องการ

วัตถุประสงค์

เพื่อหาส่วนผสมของวัสดุปลูกที่เหมาะสมต่อคุณสมบัติทางเคมีของดินปลูกและอัตราการเจริญเติบโตของแตงโมสายพันธุ์ตอปีโตลูกผสมควีนเลดี้ F1 ของวัสดุปลูก 5 ส่วนผสม ได้แก่ ขุยมะพร้าว กาบมะพร้าว มูลวัว แกลบดำ และดินปลูก เพื่อการคำนวณที่เหมาะสมได้แก่อัตราการเจริญเติบโตของความสูงของต้น (ร้อยละ) อัตราการเจริญเติบโตของจำนวนใบ (ร้อยละ) และอัตราการเจริญเติบโตของขนาดลำต้น ในส่วนของการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุปลูก ประกอบด้วย ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และต้นทุนต่อถุง

ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการศึกษารววัสดุปลูก 5 ส่วนผสม ได้แก่ ขุยมะพร้าว กาบมะพร้าว มูลวัว แกลบดำ และดินปลูกเพื่อการค้า
2. การเจริญเติบโตของแตงโม ได้แก่ อัตราการเจริญเติบโตของความสูงของต้น (ร้อยละ) อัตราการเจริญเติบโตของจำนวนใบ (ร้อยละ) และอัตราการเจริญเติบโตของขนาดลำต้น ในส่วนของการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุปลูก ประกอบด้วย ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และต้นทุนต่อถุง

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้วัสดุปลูกมี 5 ส่วนผสม ได้แก่ ขุยมะพร้าว กาบมะพร้าว มูลวัว แกลบดำ และดินปลูกเพื่อการค้า มาทำการทดลองตามวิธีการออกแบบการทดลองแบบ D-optimal ซึ่งเป็นการออกแบบส่วนผสมแบบมีข้อจำกัด ข้อจำกัดของแต่ละส่วนผสมที่ทำการศึกษานี้มีหน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนักแสดงในตารางที่ 1

การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุปลูก ประกอบด้วย ต้นทุน ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (EC) สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (EC) เป็นไปตามคู่มือวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์ กรมวิชาการเกษตรโดยทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในสัดส่วนระหว่างวัสดุต่อน้ำ 1 : 2 ด้วยเครื่อง pH meter ยี่ห้อ OHAUS รุ่น Starter 3100 วิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ในสัดส่วนระหว่างวัสดุต่อน้ำ 1 : 10 ด้วยเครื่อง conduct meter ยี่ห้อ METTLER TOLEDO ในขณะที่การวัดผลอัตราการเจริญเติบโตของแตงโม ได้แก่ ความยาวของต้น จำนวนใบ และขนาดลำต้น ซึ่งทำการวัดและบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตหลัง 7 วัน และ 45 วัน หลังย้ายปลูก ระยะเวลาของงานวิจัยตั้งแต่วันที่ 15 พฤศจิกายน 2567 ถึง 2 มกราคม 2568 โดยมีรายละเอียด ได้แก่ การเจริญโตของความสูงของต้นแตงโม โดยทำการใช้สายวัด (MuSi HOME E-3, ความละเอียด 1 เซนติเมตร) วัดจากโคนต้นระดับผิวดินถึงยอดสูงสุดของต้นแตงโม แล้วทำการบันทึกค่าจากสายวัดที่อ่านค่าที่ได้ ในส่วนของการเจริญโตของจำนวนใบของแตงโม โดยนับจำนวนใบทั้งหมดต่อต้น แล้วนำค่าที่ได้มาบันทึกเป็นจำนวนใบต่อต้น การเจริญโตของขนาดลำต้นแตงโมใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ยี่ห้อ MEXCO ความละเอียด 0.001 นิ้ว วัดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นที่ความสูง 10 เซนติเมตรจากระดับผิวดิน โดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ แล้วทำการบันทึกค่าเป็นเซนติเมตรเมื่อได้ค่าทั้งหมดแล้วนำมาคำนวณตามสมการที่ 1

$$\text{อัตราการเจริญเติบโต (ร้อยละ)} = \frac{\text{ค่าที่วัดวันสุดท้าย} \times \text{ค่าที่วัดวันเริ่มต้น}}{\text{จำนวนวันที่วัด} \times \text{ค่าที่วัดวันเริ่มต้น}} \times 100 \quad (1)$$

ตารางที่ 1 ส่วนผสมและข้อจำกัดของส่วนผสมที่นำไปใช้ในการออกแบบการทดลอง

ส่วนผสม	สัญลักษณ์	ข้อจำกัด	
		ค่าต่ำ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ค่าสูง (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)
ขุยมะพร้าว	A	15	20
กาบมะพร้าว	B	15	20
มูลวัว	C	20	25
แกลบดำ	D	15	20
ดินปลูกเพื่อการค้า	E	30	35

การปลูกและดูแลรักษา

1. การเตรียมต้นกล้าใช้แต่งโมสายพันธุ์ตอปีโตลูกผสมควินเลดี้ F1 เนื้อสีส้ม เนื้อแน่น หวาน สีเปลือกเขียวอ่อนสลับลายเขียวเข้ม ความหวาน 14-15 บริกซ์ อายุการเก็บเกี่ยว 60-65 วัน หลังหยอดเมล็ด ทำการเพาะกล้าในถาดเพาะ
2. จัดวางถุงปลูกตามแผนการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design) เรียงตามลำดับ 1-20 ตามลำดับ แต่ละแถวระยะห่างระหว่างถุง 20 เซนติเมตร
3. ทำการย้ายต้นกล้าที่มีอายุ 21 วัน ลงในถุงปลูกขนาด 8×16 นิ้ว ที่ทำการผสมตามอัตราส่วนของแผนการทดลองแบบส่วนผสม Mixture Design ปลูก 1 ต้นต่อถุง หลังจากนั้นรดน้ำให้ชุ่มทุกถุง
4. การให้น้ำด้วยระบบน้ำหยดวันละ 2 ครั้ง เช้าและเย็น ให้น้ำครั้งละ 10 นาที (ปริมาณน้ำ 200 มิลลิเมตรต่อครั้งต่อถุง) จนถึงวันเก็บเกี่ยวผลผลิต และหากต้นแต่งโมแสดงอาการเหี่ยวหรืออาการได้รับน้ำไม่เพียงพอให้รดน้ำเพิ่มจนดินปลูกชื้น
5. การให้ปุ๋ยในช่วงระยะการเจริญเติบโต ในช่วงอายุ 7 วัน หลังจากที่ดินพืชมียาจริง 2-3 ใบ ให้ปุ๋ยสูตร 46-0-0 ในอัตรา 5 กรัมต่อถุง เมื่อพืชอายุ 14 วัน ให้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 โดยใช้อัตรา 5 กรัมต่อถุง ในระยะอายุ 21 วัน ให้ปุ๋ยสูตร 20-20-0 ในอัตรา 5 กรัมต่อถุง และเมื่ออายุ 42 วัน ให้ปุ๋ยสูตร 13-13-21 ในอัตรา 5 กรัมต่อถุง

ผลการดำเนินการ

ตารางที่ 2 ผลของอัตราการเจริญเติบโตของความสูงของต้น อัตราการเจริญเติบโตของจำนวนใบ อัตราการเจริญเติบโตของขนาดลำต้น ต้นทุน EC และ ค่า pH

ส่วนผสมที่	A	B	C	D	E	PH.	NoS.	SoS.	Cost	EC (dS/cm)	pH
1	15.0	15.6	22.6	15.0	31.8	43.72	21.96	1.2	12.16	0.84	7.5
2	15.0	15.0	20.0	20.0	30.0	52.81	23.19	0.25	12.06	1.7	7.2
3	19.5	15.0	20.5	15.0	30.0	72.22	21.48	0.68	12.56	2.23	6.8
4	15.0	15.0	20.0	15.0	35.0	68.33	20	0.74	12.31	2.54	6.9
5	17.0	15.8	22.2	15.0	30.0	81.11	25.93	0.65	12.33	0.72	7.3
6	15.0	16.7	21.4	17.0	30.0	53.88	23.7	0.28	12.24	1.38	7.2
7	15.0	20.0	20.0	15.0	30.0	72.92	23.56	0.93	12.69	1.45	6.9
8	17.8	15.0	20.0	16.3	30.8	60.74	17.04	0.3	12.42	1.52	7.3
9	15.0	15.0	25.0	15.0	30.0	54.61	21.5	0.58	11.94	1.55	7
10	15.0	15.0	20.0	17.3	32.7	85	24.1	0.59	12.2	1.58	7.8
11	15.0	15.0	22.9	17.1	30.0	66.81	22.96	0.23	11.99	1.17	7.9
12	15.0	17.1	20.0	15.0	32.9	65.8	21.62	0.34	12.47	1.09	7.2
13	17.2	16.5	20.0	16.3	30.0	47.27	25.68	0.48	12.49	1.52	8.1
14	17.4	15.0	21.3	15.0	31.3	56.19	15.78	0.63	12.37	1.6	7.4
15	17.7	16.3	20.0	15.0	31.0	50	24.44	0.14	12.58	1.76	7.9
16	15.6	17.9	20.0	15.7	30.8	46.11	22.4	0.32	12.54	1.8	7.4
17	16.2	15.2	21.4	16.5	30.7	63.7	18.56	0.28	12.21	1.18	7.9

ส่วนผสมที่	A	B	C	D	E	PH.	NoS.	SoS.	Cost	EC (dS/cm)	pH
18	16.3	15.6	20.0	15.7	32.3	65.88	16.21	0.28	12.41	1.42	7.3
19	15.0	15.0	20.0	20.0	30.0	44.44	21.11	0.14	12.06	2.09	7.6
20	15.0	15.0	25.0	15.0	30.0	66.26	19.12	0.36	11.94	1.68	7.1

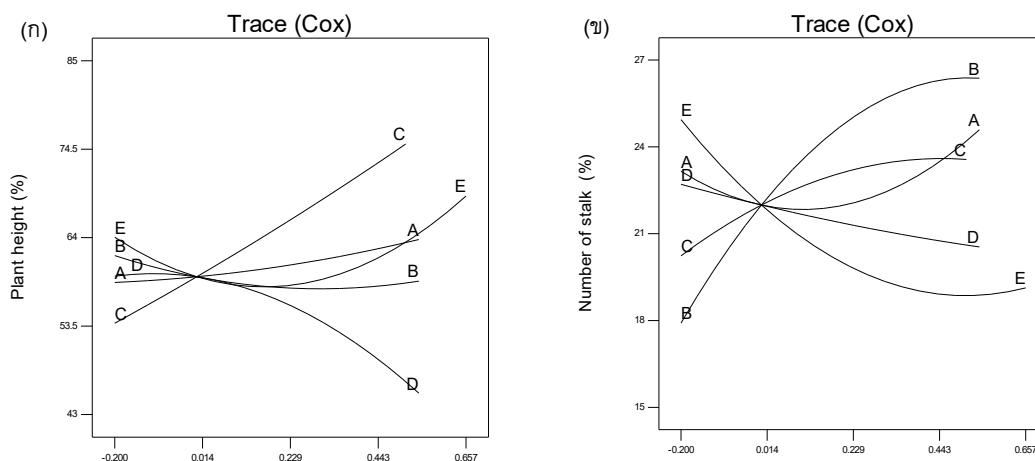
*หมายเหตุ PH. คือ อัตราการเจริญเติบโตของความสูงของต้น NoS. คือ อัตราการเจริญเติบโตของจำนวนใบ
SoS. คือ อัตราการเจริญเติบโตของขนาดลำต้น Cost คือ ต้นทุน
EC คือ ค่าการนำไฟฟ้า pH คือ กรด-ด่าง

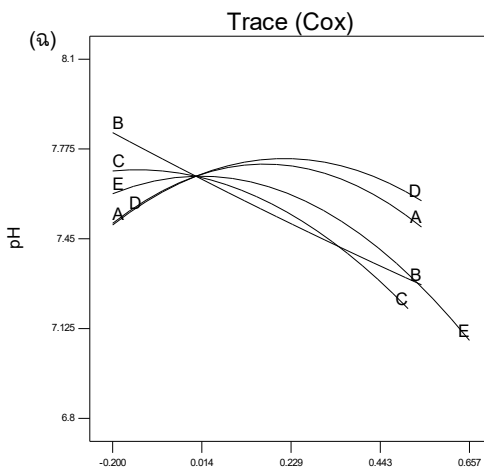
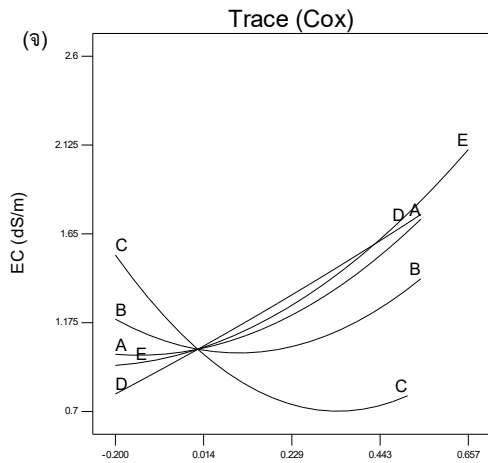
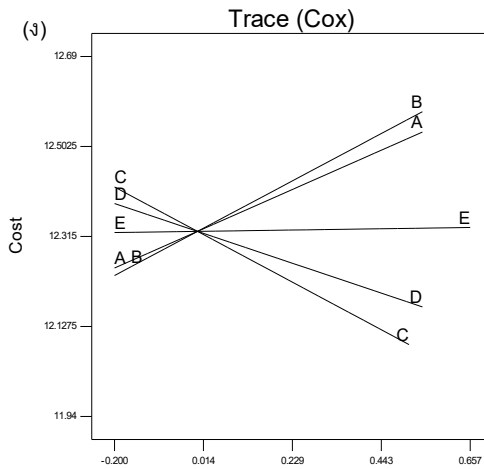
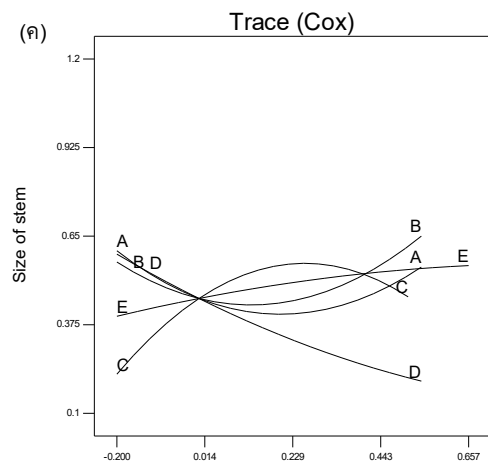
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราการเจริญเติบโตของความสูงของต้น อัตราการเจริญเติบโตของจำนวนใบ อัตราการเจริญเติบโตของขนาดลำต้น EC และ ค่า pH

สมบัติทางเคมีวัสดุปลูกและการเจริญเติบโตของแตงโม	สมการถดถอย	R ²	R ² Adj.
อัตราการเจริญเติบโตของความสูงของต้น (ร้อยละ)	ความยาวของต้น (ร้อยละ) = $-41.99A + 51.71B + 82.09C - 134.16 + 36.67E - 3.86AB + 4.60AC - 5.26CE + 4.15DE$	0.77	0.61
อัตราการเจริญเติบโตของจำนวนใบ (ร้อยละ)	จำนวนของแขนงใบ (ร้อยละ) = $27.43A - 27.70B - 4.69C - 4.42D + 22.96E + 1.56AB - 1.85AE$	0.79	0.69
อัตราการเจริญเติบโตของขนาดลำต้น (ร้อยละ)	ขนาดของลำต้น (ร้อยละ) = $3.18A + 3.52B - 4.45C + 0.70D + 0.05E - 0.11AE - 0.07BD - 0.09BE + 0.14CE$	0.88	0.80
Cost	Cost = $0.19A + 0.20B + 0.05C + 0.07D + 0.12E$	0.99	0.99
EC	EC = $2.59A + 1.5B + 1.61C + 1.89D + 2.49E - 1.86AB - 2.84AC - 4.75AD - 1.43AE - 8.57BC + 5.27BD - 3.8BE - 2.09CD - 2.05CE - 2.51DE$	0.93	0.75
pH	pH = $-1.83A - 1.85B - 3.43C - 2.95D - 1.87E + 0.27AB + 0.12CD + 0.13CE + 0.01DE$	0.84	0.72

ตารางที่ 2 แสดงผลของอัตราการเจริญเติบโตของความสูงของต้น อัตราการเจริญเติบโตของจำนวนใบ อัตราการเจริญเติบโตของขนาดลำต้น ต้นทุน ค่า EC และ ค่า pH ตามแผนการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมโดยมี 3 ตัวอย่าง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ผลการทดลองในตารางที่ 2 สามารถนำมาวิเคราะห์เลือกรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติของอัตราการเจริญเติบโตของความสูงของต้น อัตราการเจริญเติบโตของจำนวนใบ อัตราการเจริญเติบโตของขนาดลำต้น ต้นทุน ค่า EC และ ค่า pH โดยใช้โปรแกรมสำเร็จ Design-Expert version 7.0 ซึ่งแสดงในตารางที่ 3 รูปแบบทางสถิติของอัตราการเจริญเติบโตของแตงโม ได้แก่ อัตราการเจริญเติบโตของความสูงของต้น (ร้อยละ) อัตราการเจริญเติบโตของจำนวนใบ (ร้อยละ) และอัตราการเจริญเติบโตของขนาดของลำต้น (ร้อยละ) ส่วนของสมบัติทางเคมีของดินปลูก ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และค่าความเป็นกรดด่าง (pH) มีรูปแบบเชิงเส้นโค้ง (quadratic model) โดยมีค่า p-value ของแต่ละรูปแบบน้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่ารูปแบบจำลองมีของสมการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสม สำหรับข้อมูลและสามารถยอมรับรูปแบบสมการถดถอยนั้นได้ ในขณะเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R²) และค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดปรับแล้ว (R² Adj.) ของแต่ละรูปแบบมีค่าสูงใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่าสมการถดถอยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณส่วนผสมของส่วนผสมทั้งห้าชนิด, อัตราการเจริญเติบโตของแตงโมและสมบัติทางเคมีของดินปลูกอย่างเหมาะสม ภาพที่ 1 (ก) (ข) (ค) (ง) (จ) และ (ฉ) เป็นกราฟ trace ของผลตอบสนองสามารถนำมาวิเคราะห์แต่ละส่วนผสมว่ามีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของผล

การเจริญเติบโตของแตงโมและสมบัติทางเคมีของดินปลูก โดยทำการพิจารณาจากแนวโน้มของเส้นกราฟ ถ้าเส้นกราฟของ ส่วนผสมใดมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง แสดงว่าส่วนผสมนั้นมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเจริญเติบโตของ แตงโมและสมบัติทางเคมีของดินปลูก ภาพที่ 1 (ก) พบว่า ขุยมะพร้าว (A) จากเส้นกราฟเป็นเส้นตรงที่เพิ่มขึ้นและลดลง แสดง ว่าไม่มีอิทธิพลต่อความสูงของต้นแตงโม (ร้อยละ) ในขณะที่ส่วนผสมของกาบมะพร้าว (B) มูลวัว (C) แกลบดำ (D) ดินปลูกเพื่อ การค้า (E) มีอิทธิพลต่อความสูงของต้นแตงโม (ร้อยละ) จากเส้นกราฟเป็นเส้นตรงและเส้นโค้งที่เพิ่มขึ้นและลดลงชัดเจน ส่วน ในภาพที่ 1 (ง) พบว่า ดินปลูกเพื่อการค้า (E) เส้นกราฟเป็นเส้นตรงที่เพิ่มขึ้นและลดลงเล็กน้อย แสดงว่าไม่มีอิทธิพลต่อต้นทุน ในขณะที่ส่วนผสมของขุยมะพร้าว (A) กาบมะพร้าว (B) มูลวัว (C) และแกลบดำ (D) มีอิทธิพลต่อต้นทุนการปลูกแตงโม ภาพ ที่ 1 (ข) (ค) (จ) และ (ฉ) เห็นได้ว่าขุยมะพร้าว (A) กาบมะพร้าว (B) มูลวัว (C) แกลบดำ (D) และ ดินปลูกเพื่อการค้า (E) มี อิทธิพลต่อจำนวนใบของต้นแตงโม (ร้อยละ), ขนาดของลำต้นแตงโม (ร้อยละ) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) จากเส้นกราฟเป็นเส้นตรงและเส้นโค้งที่เพิ่มขึ้นและลดลงชัดเจน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Silva et al. (2021) และ Park et al. (2024) การหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดโดยให้ผลตอบสนองต่ออัตราการเจริญเติบโตของความสูงของต้น (ร้อยละ) อัตราการเจริญเติบโตจำนวนใบ (ร้อยละ) อัตราการเจริญเติบโตขนาดของลำต้น (ร้อยละ) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ค่า ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และต้นทุนของดินปลูกมีค่าผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดร่วมกัน โดยการใช้เทคนิคการซ้อนทับกัน ของกราฟเส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน (overlay plot) โดยกำหนดเงื่อนไขของอัตราการ เจริญเติบโตของความสูงของต้น (ร้อยละ) อัตราการเจริญเติบโตของจำนวนใบ (ร้อยละ) อัตราการเจริญเติบโตของขนาดลำต้น (ร้อยละ) กำหนดเงื่อนไขเป็น Maximize ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้า (EC) กำหนดที่ 1.8 ถึง 2.4 (dS/m), ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) กำหนดอยู่ในช่วง 6.8 ถึง 7.2 (Wongjun Nunkong, 2024) และต้นทุนของดินปลูกกำหนดเป็น Minimize ซึ่งเป็นค่าที่ ใช้สำหรับการปลูกแตงโม จากการวิเคราะห์พบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ระดับของส่วนผสมที่มีขุยมะพร้าว (A) ร้อยละ 15 กาบมะพร้าว (B) ร้อยละ 15 มูลวัว (C) ร้อยละ 20 แกลบดำ (D) 15.54 และดินปลูกเพื่อการค้า (E) 34.47 โดย น้ำหนัก ซึ่งทำให้ได้ผลตอบสนองของอัตราการเจริญเติบโตของความสูงของต้นร้อยละ 76.97 อัตราการเจริญเติบโตของ จำนวนใบร้อยละ 21.30 อัตราการเจริญเติบโตของขนาดลำต้นร้อยละ 0.733 ค่าการนำไฟฟ้า (EC) 2.19 dS/m ค่าความ เป็นกรดต่าง (pH) 7.2 และต้นทุนของดินปลูก 12.29 บาทต่อถุง แสดงตามภาพที่ 2





*หมายเหตุ A คือ ขุยมะพร้าว B คือ กาบมะพร้าว C คือ มูลวัว D คือ แกลบดำ E คือ ดินปลูกเพื่อการค้า

ภาพที่ 1 กราฟ trace ของ (ก) อัตราการเจริญเติบโตของความสูงของต้น (ร้อยละ) (ข) อัตราการเจริญเติบโตของจำนวนใบ (ร้อยละ) (ค) อัตราการเจริญเติบโตของขนาดของลำต้น (ร้อยละ) (ง) ต้นทุน (จ) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และ (ฉ) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)

Criteria

Solutions

Graphs

Solutions

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

Constraints

</

ภาพที่ 2 ส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุปลูกแต่งโมเดลจากการวิเคราะห์ของโปรแกรมสำเร็จรูป Design Expert 7

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาส่วนผสมของวัสดุปลูกที่เหมาะสมต่อคุณสมบัติทางเคมีของดินปลูกและอัตราการเจริญเติบโตของแตงโมสายพันธุ์ตอปีโดลูกผสมควินเลดี้ F1 โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design) วัสดุปลูกที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ขุยมะพร้าว กาบมะพร้าว มูลวัว แกลบดำ และดินปลูกเพื่อการค้า การหาส่วนผสมของวัสดุปลูกมีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของแตงโมและคุณสมบัติของดินปลูก โดยมีส่วนผสมที่เหมาะสม ประกอบด้วย ขุยมะพร้าวร้อยละ 15 กาบมะพร้าวร้อยละ 15 มูลวัวร้อยละ 20 แกลบดำร้อยละ 15.54 และดินปลูกเพื่อการค้าร้อยละ 34.47 ซึ่งทำให้อัตราความสูงของต้นร้อยละ 76.97 อัตราความสูงของจำนวนใบร้อยละ 21.30 อัตราความสูงของขนาดลำต้นร้อยละ 0.732 ต้นทุนร้อยละ 12.29 บาท ค่า EC 2.19 (dS/m) และค่า pH 7.2

ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำสูตรวัสดุปลูกที่เหมาะสมไปทดลองใช้ในพื้นที่จริงเพื่อประเมินความเหมาะสมในสภาพภูมิอากาศต่าง ๆ
2. ควรขยายการศึกษาไปยังพืชเศรษฐกิจชนิดอื่น เพื่อสร้างสูตรวัสดุปลูกเฉพาะพืช
3. ควรศึกษาการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชนิดอื่นร่วมด้วย เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มมูลค่าเศษวัสดุทางการเกษตร

เอกสารอ้างอิง

- กรมส่งเสริมการเกษตร. (2567). “แตงโมเนื้อ”. <http://production.doae.go.th>.
- นภาพร จิตต์ศรีธธา และวัชรวิทย์ รัชมี. (2562). ผลของชนิดวัสดุปลูกที่ส่งต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของเมล่อน (*Cucumis melo* L.). *วารสารวิจัยไร่ไพพรรณี*, 13(2), 7-24.
- วาสนา วงษ์ใหญ่. (2555). *พฤกษศาสตร์พืชเศรษฐกิจมะพร้าว*. ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ วิทยาเขต กำแพงแสน จังหวัดนครปฐม.
- วิทยา สุริยาภณานนท์. (2523). *เอกสารประกอบการสอนวิชาอาหารและเครื่องปลูกของพืชสวน*. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมิตรา สุปินราช และอิศร์ สุปินราช. (2561). ผลของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมถ่วง. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 49(พิเศษ1), 47-52.
- สมิตรา สุปินราช, อิศร์ สุปินราช และรัชนิพร ศรีวันชัย. (2559). ผลของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโตและการออกดอกของ ผีเสื้อ. *พืชศาสตร์สงขลานครินทร์*, 2, 77-82.
- Fukuda, I. M., Pinto, C. F. F., Moreira, C. S., Saviano, A. M., & Lourenço, F. R. (2018). Design of experiments (DoE) applied to pharmaceutical and analytical quality by design (QbD). *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 54(Special), e01006.
- Nurin, A. Y., Tee, T. P., Chin, N. L., Zainudin, M. H. M., & Nayan, N. (2024). Optimization of watermelon waste as a bulking agent for sustainable co-composting of livestock manures using response surface methodology. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1368970.
- Park, S.K., Lee, B.S., & Chung, S.J. (2024). Determination of Substrate Mixing Ratios for the Hydroponic Cultivation of Watermelon. *Korean Society for Bio-Environment Control*, 33(4), 34–45.
- Romo, J. M., Smith, I. N., Galloway, M., & Cuthbertson, T. J. (2024). The optimal formulation of a readily compostable horticultural growing substrate for vertical farming was determined using design of experiments. *Scientific Reports*.
- Silva, J., da Silva Dias, N., Jales, G., Rges, L., Freitas, J., Umbelino, B., Alves, T., Silva, A., Fernandes, C., Paiva, E., Morais, P., Melo, A., Brito, M., Neto, M., & Fernandes, P. (2021). Physiological responses and production of mini-watermelon irrigated with reject brine in hydroponic cultivation with substrates. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–14.

Wongjun Nunkong. (2024). Substrate Culture from Leaf Sheath of Banana and Sawdust. *Recent Science and Technology*, 16(1), 103–115.

Translated Thai References

Department of Agricultural Extension. (2024). Watermelon flesh. <http://production.doae.go.th>

Jitsattha, N., & Ratsamee, W. (2019). Effect of Substrates on Growth and Yield of Muskmelon (*Cucumismelo* L.). *Rambhai Barni Rajabhat University Research Journal*, 13(2), 7–24.

Wongyai, W. (2012). Botany of coconut as an economic crop. National Agricultural Extension and Training Center, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, Thailand.

Suriyapananon, W. (1980). Course materials for food and growing media of horticultural crops. Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Kasetsart University.

Supinrach, S. & Supinrach, I. (2018). Effects of growing media on the growth of butterhead lettuce in bags. *Agricultural Science Journal*, 49(Special Issue 1), 47–52.

Supinrach, S., Supinrach, I. & Sriwanchai, R. (2016). Effects of growing media on growth and flowering of butterfly pea. *Songklanakarin Journal of Plant Science*, 2, 77–82.

การปรับปรุงท่าทางการทำงานสำหรับกระบวนการติดหูกระดาษโดยใช้หลักการยศาสตร์ กรณีศึกษา บริษัทผู้ผลิตและจำหน่ายบรรจุภัณฑ์กระดาษ

A CASE STUDY OF IMPROVING WORKING POSTURES IN THE PAPER BAG HANDLE ATTACHMENT PROCESS THROUGH ERGONOMIC PRINCIPLE: A PAPER PACKAGING MANUFACTURER AND DISTRIBUTOR

จุฑาทิพย์ ลีลาธนาพิพัฒน์¹ ภูมิ จาตุณิตานนท์²

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

²สาขาวิศวกรรมการผลิตยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

Jutathip Leelathanapipat¹ Poom Jatunitanon²

¹Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Panyapiwat Institute of Management

²Automotive Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering and Technology,
Panyapiwat Institute of Management

*Corresponding author: Email: jutathiplee@pim.ac.th

บทคัดย่อ

สำหรับกระบวนการติดหูกระดาษเป็นขั้นตอนที่ใช้ฝีมือของพนักงานเป็นหลักและใช้เวลาในการผลิตนาน ซึ่งส่งผลกระทบต่อความเมื่อยล้าของพนักงานเป็นอย่างมาก อีกทั้งยังมีข้อร้องเรียนจากพนักงานในการทำงาน ดังนั้นผู้วิจัยเล็งเห็นถึงความสำคัญในการลดความเมื่อยล้าในการทำงานของพนักงานติดหูกระดาษ โดยนำหลักการยศาสตร์เข้ามาศึกษาการทำงาน โดยขั้นตอนการท้าวิจัยเริ่มจากพนักงานจำนวน 7 คน ประเมินระดับความไม่สบายในร่างกายของแต่ละส่วน หลังจากนั้นดำเนินการออกแบบโต๊ะทำงาน และเลือกใช้เก้าอี้ที่นั่งทำงานที่เหมาะสมตามหลักการยศาสตร์ ซึ่งการออกแบบโต๊ะทำงานใช้ข้อมูลสัดส่วนร่างกายของพนักงานติดหูกระดาษ 12 ตำแหน่งเป็นเกณฑ์ในการออกแบบ โดยหลังการปรับปรุงอุปกรณ์การทำงาน ระดับค่าเปอร์เซ็นต์ความรู้สึกลดลงในส่วนของหัวเข่า 84.62% สะโพกหรือต้นขา 47.06% หลังส่วนบน 44.74% มือหรือข้อมือ 44.44% หลังส่วนล่าง 44.00% และคอ 39.40% ตามลำดับ และมีการประเมินความเสี่ยงในการทำงาน ก่อนการปรับปรุงมีระดับคะแนนที่ 6.85 คะแนน หลังจากการปรับปรุงผลการประเมินด้วยเทคนิค RULA หลังการปรับปรุง มีระดับคะแนนที่ 6.14 คะแนน ลดจากเดิม 0.71 คะแนน หรือลดลงจากเดิมร้อยละ 10.36 ซึ่งถือว่ายังอยู่ในระดับความเสี่ยงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

คำสำคัญ : การยศาสตร์, เทคนิค RULA, ท่าทางการทำงาน, กระดาษ

Abstract

The paper bag handle attachment process was a labor-intensive task that relied mainly on workers' manual skills and required a long production time, leading to worker fatigue and complaints regarding working conditions. This study aimed to reduce work-related fatigue among workers involved in the paper bag handle attachment process by applying ergonomic principles. The study was conducted in a paper packaging manufacturing and distribution company, with seven workers participating in the assessment of discomfort levels in different body parts. Based on the assessment results, a worktable was designed and an appropriate working chair was selected according to ergonomic principles, using anthropometric data from twelve body dimensions of the workers as design criteria. After the ergonomic

improvements, perceived discomfort was reduced by 84.62% in the knees, 47.06% in the hips or thighs, 44.74% in the upper back, 44.44% in the hands or wrists, 44.00% in the lower back, and 39.40% in the neck. Additionally, work risk levels were evaluated using the Rapid Upper Limb Assessment (RULA) technique. The RULA score decreased from 6.85 to 6.14, a reduction of 10.36%; however, the risk level remained relatively high, indicating the need for further ergonomic improvements.

Keywords : Ergonomics, Rapid Upper Limb Assessment, Work postures, Paper Bag

บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์กระดาษได้มีการขยายตัวและเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเริ่มตั้งแต่ที่มีการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ 2019 (COVID-19) ผู้คนได้ปรับเปลี่ยนการใช้ชีวิตมาอยู่บ้านมากขึ้น เพื่อป้องกันความเสี่ยงในการติดเชื้อ ทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนพฤติกรรม มีการหันมาสั่งอาหารและสินค้าออนไลน์ผ่านทางเดลิเวอรี่ ดังนั้นบรรจุภัณฑ์กระดาษจึงเข้ามาเป็นตัวเลือกที่สำคัญของผู้บริโภค โดยเฉพาะถุงกระดาษที่สามารถใช้งานได้สะดวก เหมาะแก่การจัดส่งของให้ลูกค้า รวมถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และเมื่อเสื่อมสภาพแล้วก็สามารถนำไปใช้ซ้ำในการผลิตอื่นได้อีก ซึ่งช่วยตอบโจทย์ต่อความต้องการของผู้บริโภคได้เป็นอย่างดี

ซึ่งบริษัททรีคศึกษา เป็นบริษัทผู้ผลิตและจำหน่ายบรรจุภัณฑ์กระดาษ ซึ่งมีทั้งแบบถุงกระดาษหูเกลียว ถุงอเนกประสงค์ และซองขนม ที่สามารถช่วยอำนวยความสะดวกในการบรรจุสินค้าประเภทต่างๆ เนื่องจากถุงกระดาษน้ำตาลหูเกลียวนั้นมียอดขายที่สูงขึ้น ทางบริษัททรีคศึกษาจึงได้ดำเนินการเพิ่มกำลังการผลิตของถุงกระดาษให้ทันต่อความต้องการของลูกค้า โดยเพิ่มเครื่องจักรสำหรับผลิตถุงกระดาษและเพิ่มพนักงานติดหูกระดาษ ส่งผลให้กำลังการผลิตของถุงกระดาษสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะยอดการติดหูกระดาษมียอดผลิตที่สูงขึ้น ทำให้พนักงานติดหูกระดาษทำงานเพิ่มขึ้น ทางผู้วิจัยจึงได้มีการใช้แบบประเมินระดับความไม่สบายในร่างกาย 12 ส่วน มาให้พนักงานติดหูกระดาษทั้งหมด 7 คน ได้ทำการประเมินร่างกายด้านซ้ายและด้านขวา เพื่อเข้ามาวิเคราะห์ภาระงานของกล้ามเนื้อที่เกิดขึ้นจากการทำงาน อ้างอิงจาก 5 อันดับที่สูงที่สุด อันดับที่มีอาการปวดมากที่สุด คือ ไหล่ 2.79 คะแนน รองลงมาคือ หลังส่วนบน 2.71 คะแนน สะโพกหรือต้นขา 2.43 คะแนน ส่วนคอ 2.36 คะแนน และแขนส่วนบน 1.93 คะแนน ตามลำดับ

โดยจากการศึกษาการทำงานของพนักงานติดหูกระดาษ แก้อ้อที่พนักงานติดหูกระดาษนั่งประจำทุกวัน มีการใช้เบาะรองนั่งบนแก้อ้อ เป็นแก้อ้อเหล็กมีพนักพิงสีดำและเป็นวัสดุที่มีความแข็ง ซึ่งอาจทำให้มีผลกระทบต่อร่างกายในการใช้งานเป็นเวลานาน และพนักงานติดหูกระดาษต้องใช้แขนข้างขวาในการทำงานเป็นหลัก เพื่อเอื้อมมือข้างขวาไปหยิบถุงกระดาษบนสายพาน เพื่อนำมาติดกับตัวถุงกระดาษ เมื่อทางผู้วิจัยเห็นปัญหาในการทำงานของพนักงานติดหูกระดาษ จึงนำหลักการยศาสตร์ (Ergonomics) มาช่วยพัฒนากระบวนการทำงาน และวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นแล้วทำการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์การทำงาน of พนักงานให้มีประสิทธิภาพ และปรับปรุงท่าทางการทำงาน ให้มีความเหมาะสมต่อพฤติกรรมการทำงาน of พนักงานติดหูกระดาษ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อลดความเมื่อยล้าในการทำงานของพนักงานติดหูกระดาษ

ขอบเขตของการวิจัย

อุปกรณ์สำหรับพนักงานที่ถนัดมือขวาเท่านั้น

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษากระบวนการติดหูกระดาษ

การศึกษากิจกรรมการทำงานของการติดหูกระดาษ 1 ชิ้นงาน แบ่งส่วนประกอบของถุงกระดาษที่มีหูเกลียวแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ชนิดของถุงกระดาษน้ำตาล และถุงกระดาษจำนวน 2 ชิ้น โดยส่วนของถุงกระดาษที่ติดกาวไหล

ออกมาจากเครื่องทำถุงกระดาษ และไหลมายังสายพาน เพื่อให้พนักงานติดถุงกระดาษได้ทำการติดถุงกระดาษเข้าด้านในของถุงกระดาษน้ำตาลทั้งสองฝั่ง หลังจากนั้นจะออกมาเป็นสินค้าประเภทถุงกระดาษน้ำตาลหูเกลียว แสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการติดถุงกระดาษน้ำตาลหูเกลียว

สำหรับโต๊ะทำงานและเก้าอี้นั่งทำงานถือเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการปฏิบัติงานในทุกวัน ทางผู้วิจัยจึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับรูปลักษณะของอุปกรณ์การทำงานก่อนการปรับปรุง ซึ่งโต๊ะทำงานของพนักงานติดถุงกระดาษ มีขนาดของความกว้าง ความยาว และความสูง ($120 \times 60 \times 75$ เซนติเมตร) และลักษณะโต๊ะพับอเนกประสงค์ที่สามารถพับเก็บได้แสดงดังรูปที่ 2 ส่วนเก้าอี้นั่ง มีขนาดความกว้าง ความยาว และความสูง ($45 \times 50 \times 46$ เซนติเมตร) และลักษณะเก้าอี้เหล็กมีพนักพิงสีดำที่ไม่สามารถปรับขนาดความสูงของตัวเก้าอี้ได้ แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 โต๊ะทำงานของพนักงานติดถุงกระดาษ



ภาพที่ 3 เก้าอี้นั่งทำงานของพนักงานติดถุงกระดาษ

การสำรวจภาระงานของกล้ามเนื้อก่อนปรับปรุง โดยใช้แบบสอบถามประเมินความไม่สบายในร่างกาย 12 ส่วนของพนักงานติดถุงกระดาษ

การสำรวจภาระงานของกล้ามเนื้อที่เกิดขึ้นจากการทำงานหรือกิจกรรมที่เกี่ยวกับการทำงาน โดยใช้แบบสอบถาม Nordic Musculoskeletal Questionnaire (Kuorinka, 1987) ประเมินความไม่สบายในร่างกาย 12 ส่วน ร่างกายด้านซ้ายและด้านขวา ให้พนักงานติดถุงกระดาษคนที่ 1 ได้ทำการประเมิน รายละเอียดแบบประเมินแสดงดังภาพที่ 4

ทำงานติดต่อกันตั้งแต่ 1 ชั่วโมงขึ้นไป
หรือหลังจากการทำงาน

แบบสอบถามประเมินความไม่สบายในร่างกาย 12 ส่วนของพนักงานติดหูทุกระดาะ (หลังการปรับปรุง)

ส่วนที่ 1 แบบสอบถามเกี่ยวกับข้อมูลทั่วไป

ชื่อ-นามสกุล : วิศวกร

เพศ : ☐ ชาย ☒ หญิง อายุ : 45 ปี

น้ำหนัก : 54 กิโลกรัม โรคประจำตัว : ไม่มีตัวเอง

ส่วนสูง : 165 เซนติเมตร

ส่วนที่ 2 แบบประเมินระดับความไม่สบายในร่างกายของแต่ละส่วน

ด้านซ้าย	ส่วนในร่างกาย	คะแนน
1. คอ	1	
2. ไหล่	2	
3. หลังส่วนบน	1	
4. หลังส่วนล่าง	1	
5. แขนส่วนบน	2	
6. ข้อศอก	1	
7. แขนส่วนล่าง	1	
8. มือ/ข้อมือ	1	
9. สะโพก/ต้นขา	2	
10. หัวเข่า	0	
11. น่อง	0	
12. เท้า	0	

ด้านขวา	ส่วนในร่างกาย	คะแนน
1. คอ	1	
2. ไหล่	2	
3. หลังส่วนบน	1	
4. หลังส่วนล่าง	1	
5. แขนส่วนบน	2	
6. ข้อศอก	1	
7. แขนส่วนล่าง	1	
8. มือ/ข้อมือ	1	
9. สะโพก/ต้นขา	2	
10. หัวเข่า	0	
11. น่อง	0	
12. เท้า	0	

ภาพที่ 4 ตัวอย่างแบบสอบถามประเมินความไม่สบายในร่างกาย 12 ส่วนของพนักงานติดหูทุกระดาะ คนที่ 1

ซึ่งผลค่าเฉลี่ยในการประเมินของระดับคะแนนก่อนการปรับปรุงของพนักงานติดหูทุกระดาะ แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ค่าเฉลี่ยของการประเมินระดับความไม่สบายในร่างกาย 12 ส่วนร่างกายด้านซ้ายและด้านขวา
ของพนักงานจำนวน 7 คน

การประเมินความเสี่ยงในการทำงานด้านหลักการยศาสตร์ ด้วยเทคนิค RULA

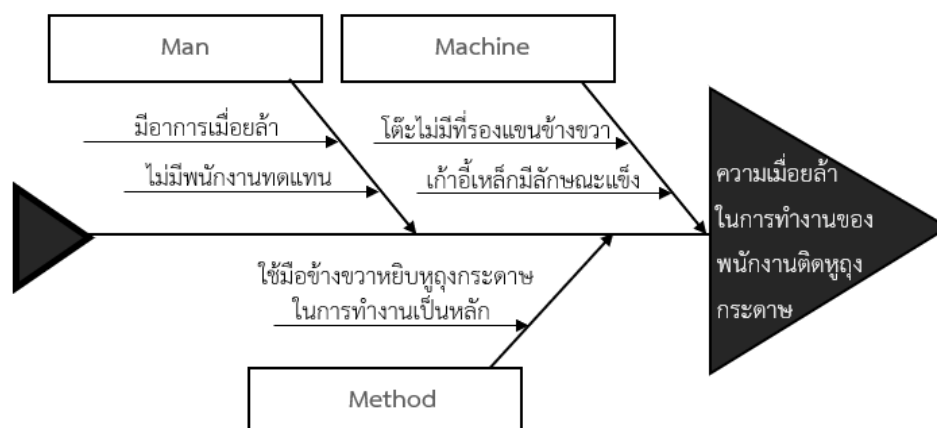
การประเมินความเสี่ยงในการทำงานด้านหลักการยศาสตร์ ด้วยเทคนิค RULA ซึ่งความเสี่ยง หมายถึงความเมื่อยล้าในการทำงาน หรือ ระดับความรุนแรง ผู้วิจัยประเมินท่าทางการทำงานของพนักงานติดหูทุกระดาะในแต่ละส่วน จำนวนทั้งหมด 7 คน สามารถสรุปผลคะแนนความเสี่ยงโดยรวมของการทำงานที่เครื่องติดหูทุกระดาะดังตารางที่ 1 โดยผลคะแนนเฉลี่ยกลุ่ม A คือ 6.43 คะแนน และผลคะแนนเฉลี่ยกลุ่ม B คือ 6.85 ซึ่งหมายถึง กระบวนการทำงานนั้นเริ่มเป็นปัญหา ควรทำการศึกษาเพิ่มเติม และควรปรับปรุง

ตารางที่ 1 การประเมินความเสี่ยงในการทำงานด้านหลักการยศาสตร์ ด้วยเทคนิค RULA (ก่อนการปรับปรุง)

การประเมิน คะแนนกลุ่ม	คะแนน ความ รุนแรง คนที่ 1	คะแนน ความ รุนแรง คนที่ 2	คะแนน ความ รุนแรง คนที่ 3	คะแนน ความ รุนแรง คนที่ 4	คะแนน ความ รุนแรง คนที่ 5	คะแนน ความ รุนแรง คนที่ 6	คะแนน ความ รุนแรง คนที่ 7	คะแนน เฉลี่ย
การประเมินคะแนนกลุ่ม A (แขน ข้อมือ)	7.00 คะแนน	5.00 คะแนน	5.00 คะแนน	7.00 คะแนน	7.00 คะแนน	7.00 คะแนน	7.00 คะแนน	6.43 คะแนน
การประเมินคะแนนกลุ่ม B (คอ ลำตัว ขา)	7.00 คะแนน	6.00 คะแนน	7.00 คะแนน	7.00 คะแนน	7.00 คะแนน	7.00 คะแนน	7.00 คะแนน	6.85 คะแนน

วิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุ กระบวนการทำงานของพนักงานติดหูกระดูก

การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาส่งผลกระทบต่อด้านการยศาสตร์ของพนักงานติดหูกระดูก ปัญหาหลัก ได้แก่ ปัญหาด้านอุปกรณ์อำนวยความสะดวก (Machine) ประกอบด้วย โต๊ะการทำงานของพนักงานไม่มีที่รองแขนข้างขวาและเก้าอี้เหล็กมีลักษณะแข็ง ส่งผลกระทบต่อร่างกายในการใช้งานเป็นเวลานาน พนักงานเกิดความเมื่อยล้า แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การวิเคราะห์สาเหตุความเมื่อยล้าในการทำงานของพนักงานติดหูกระดูก

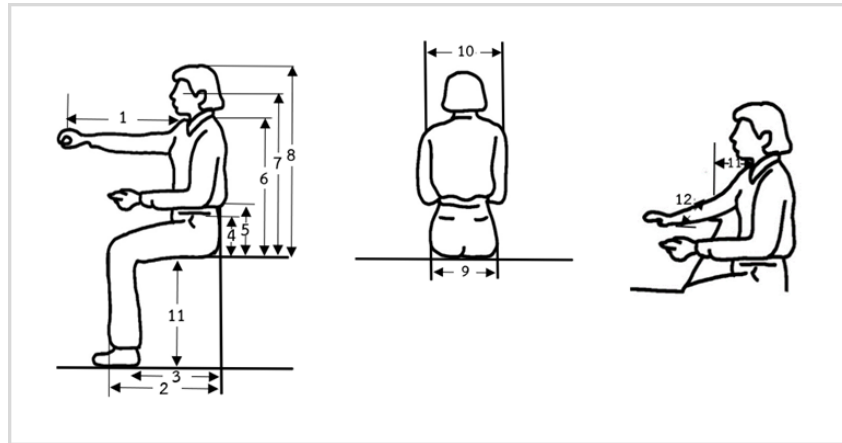
แนวทางการแก้ไข ในการปรับปรุงการทำงานของพนักงานติดหูกระดูก

การวัดสัดส่วนของพนักงานติดหูกระดูก

การวัดสัดส่วนของร่างกายพนักงานติดหูกระดูก แสดงดังรูปที่ 7 โดยใช้วิธีวัดสัดส่วนร่างกายเมื่อร่างกายอยู่ในท่าทางใดท่าทางหนึ่ง เป็นการวัดขอบเขตและเส้นทางการเคลื่อนที่ของร่างกาย โดยมีการวัดขนาดจากช่วงลำตัว ศีรษะ แขน ขา ทำนั้งในขณะที่ปฏิบัติงาน มีการกำหนดจุดหรือตำแหน่งไว้แน่นอนเป็นแบบมาตรฐาน จำนวน 13 ตำแหน่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ระยะเอื้อมแขน (Forward Reach)
2. ระยะความลึกของที่นั่งถึงหัวเข่า (Buttock-Knee Length)
3. ระยะความลึกของที่นั่งถึงข้อพับเข่า (Buttock-Popliteal Length)
4. ความสูงของศอกขณะนั่ง (Sitting Elbow Height)
5. ความสูงของระดับเอว/พุงขณะนั่ง (Sitting Mid-Shoulder/Waist Height)
6. ความสูงระดับไหล่ขณะนั่ง (Sitting Shoulder Height)
7. ความสูงระดับสายตาขณะนั่ง (Sitting Eye Height)

8. ความสูงขณะนั่ง (Sitting Height)
9. ความกว้างของสะโพก (Hip Breadth)
10. ความกว้างของช่วงไหล่ (Shoulder Breadth)
11. ความสูงของข้อพับเข่า (Popliteal Height)
12. มุมของศอก (Elbow Angle)
13. ระยะห่างจากท้องถึงแผงควบคุม (Abdominal Depth/Clearance)



ภาพที่ 7 การวัดสัดส่วนร่างกายของพนักงานติดหูกระจกตาข่าย

การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ของสัดส่วนพนักงานติดหูกระจกตาข่าย

จากการวัดสัดส่วนของพนักงานติดหูกระจกตาข่าย สามารถนำผลการวัดมาคำนวณค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 50 และ 95 ตามลำดับ เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การคำนวณค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเปอร์เซ็นต์ไทล์ของสัดส่วนพนักงาน

ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5	เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50	เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95
1. การวัดการเคลื่อนไหวมือไปทางข้างหน้า	56	3	51.07	56	60.94
2. การวัดความลึกของสะโพกถึงเข่า	53	3	48.07	53	57.94
3. การวัดความลึกของสะโพกถึงหลังข้อพับ	43	5	34.78	43	51.23
4. การวัดต้นขาขณะนั่งทำงาน	14	4	7.42	14	20.58
5. การวัดความสูงของข้อศอกขณะนั่งทำงาน	26	1	24.36	26	27.65
6. การวัดความสูงระดับไหล่ขณะนั่งทำงาน	51	2	47.71	51	54.29
7. การวัดระดับสายตาขณะนั่งทำงาน	68	3	63.07	68	72.94
8. การวัดความสูงของช่วงลำตัวขณะนั่งทำงาน	80	5	71.78	80	88.23
9. การวัดความกว้างของสะโพก	34	5	25.78	34	42.23
10. การวัดความกว้างของหัวไหล่	39	3	34.07	39	43.94
11. การวัดความสูงของข้อพับถึงพื้น	52	2	48.71	52	55.29
12. การวัดร่างกายด้านขวา ระยะห่าง ช่วงไหล่ถึงโต๊ะทำงาน	28	1	26.36	28	29.65
13. การวัดข้อพับด้านในแขนข้างขวาถึงขอบโต๊ะทำงาน	15	1	13.36	15	16.65

จากตารางที่ 2 การคำนวณหาตำแหน่งของเปอร์เซ็นต์ไทล์ (Percentile) สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังสมการที่ 1

$$P_k = \bar{X} + (Z \times SD) \quad (1)$$

ความหมายของตัวแปร

P_k คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ต้องการหา

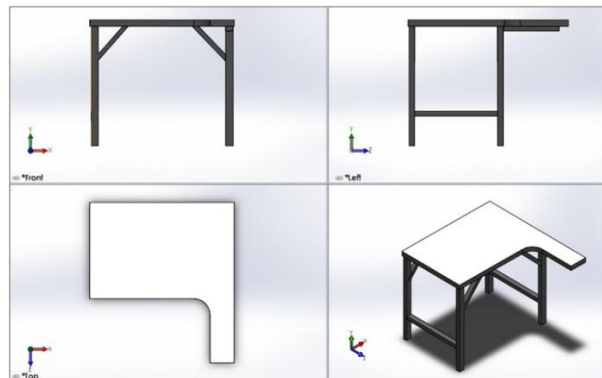
$\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ย (Mean)

Z คือ ค่าคะแนนมาตรฐาน (Z-score) เช่น เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 ใช้ $Z = 1.645$ สำหรับคนตัวเล็ก

SD คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

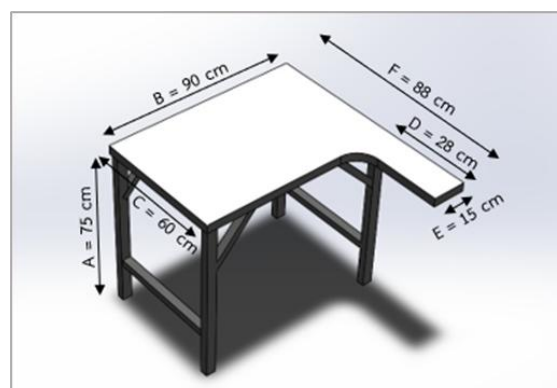
การออกแบบโต๊ะทำงานของพนักงานติดหูกระดูกดาซ

การออกแบบโต๊ะทำงานของพนักงานติดหูกระดูกดาซ เพิ่มพื้นที่สำหรับให้พนักงานได้วางแขนข้างขวา เพื่อลดความเมื่อยล้าในการทำงาน แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การออกแบบโต๊ะสำหรับการวางมือข้างขวาในการทำงานของพนักงานติดหูกระดูกดาซ

จากภาพที่ 8 ขนาดการออกแบบโต๊ะทำงานของพนักงานติดหูกระดูกดาซ จะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่คำนวณในตารางที่ 1 ที่ทางผู้วิจัยได้เลือกสัดส่วนขนาดร่างกายที่เป็นผล โดยตรงต่อการออกแบบโต๊ะการทำงาน สำหรับการกำหนดความกว้าง ความยาวและความสูงของโต๊ะทำงานของพนักงานติดหูกระดูกดาซ ดังแสดงภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ขนาดที่ออกแบบสำหรับโต๊ะทำงานของพนักงานติดหูกระดูกดาซ (หน่วย : เซนติเมตร)

จากภาพที่ 9 ผู้วิจัยออกแบบสำหรับโต๊ะทำงานของพนักงานติดหูกระดูกดาซ รายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ตำแหน่ง A คือ ความสูงของโต๊ะทำงาน จะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95 ของค่าการวัดต้นขาขณะนั่งทำงาน (Thigh clearance) ที่ 20.21 เซนติเมตร บวกกับค่าของการวัดความสูงของข้อพับถึงพื้น (Popliteal height) ที่ 54.41 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 74.62 เซนติเมตร ประมาณค่าที่ 75 เซนติเมตร

2) ตำแหน่ง B คือ ความยาวของโต๊ะทำงาน ใช้ขนาดเดียวกันกับโต๊ะก่อนการปรับปรุง มีค่าเท่ากับ 90.00 เซนติเมตร

3) ตำแหน่ง C คือ ความกว้างของโต๊ะทำงาน ใช้ขนาดเดียวกันกับโต๊ะก่อนการปรับปรุง มีค่าเท่ากับ 60.00 เซนติเมตร

4) ตำแหน่ง D คือ ด้านความยาวสำหรับพื้นที่รองแขน จะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 ของค่าการวัดร่างกายด้านขวา ระยะห่าง ช่วงไหล่ถึงโต๊ะทำงาน (Right Body Measurement: Distance from shoulder to work desk) ที่ 28.00 เซนติเมตร

5) ตำแหน่ง E คือ ด้านความกว้างสำหรับพื้นที่รองแขน จะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 ของค่าการวัดข้อพับด้านใน แขนข้างขวาถึงขอบโต๊ะทำงาน (Measurement from inside crook of right arm to edge of worktable) ที่ 15.10 เซนติเมตร ประมาณค่าที่ 15.00 เซนติเมตร

หลังจากการออกแบบขนาดของโต๊ะทำงาน ได้นำมาสร้างขึ้นรูปเป็นโต๊ะสำหรับการทำงานของพนักงานติดหู ฤกษ์กระดาศ แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 โต๊ะหลังการปรับปรุงสำหรับในการทำงานของพนักงานติดหูฤกษ์กระดาศ

การเลือกใช้เก้าอี้สำหรับพนักงานติดหูฤกษ์กระดาศ

การเลือกใช้เก้าอี้ของพนักงานติดหูฤกษ์กระดาศ โดยการนำค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ได้จากการวัดสัดส่วนร่างกายของพนักงาน นำข้อมูลมากำหนดขนาดของเก้าอี้ที่มีความใกล้เคียงกับขนาดช่องว่างใต้โต๊ะดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเลือกใช้เก้าอี้ โดยอ้างอิงจากค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์

อันดับที่	รายละเอียดของเก้าอี้	ตำแหน่งค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ใช้ในการวัด สัดส่วนพนักงานติดหูฤกษ์กระดาศ	เปอร์เซ็นต์ไทล์ ที่ควรใช้	ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์
1	ความสูงจากพื้นถึงที่รองนั่ง (Seat surface height)	เปอร์เซ็นต์ไทล์ของการวัดความสูงของข้อพับถึงพื้น (Popliteal height)	เปอร์เซ็นต์ไทล์ ที่ 50	53 เซนติเมตร

จากตารางที่ 3 สามารถนำค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ได้จากการเลือกใช้เก้าอี้ของกลุ่มพนักงานติดหูฤกษ์กระดาศ มาเสนอแนวทางในเลือกเก้าอี้สำเร็จรูป เพื่อใช้ในนั่งทำงานของพนักงานติดหูฤกษ์กระดาศ เก้าอี้ที่ทางผู้วิจัยได้เสนอเป็นเก้าอี้บาร์เตี้ย แสดงดังภาพที่ 11 เป็นเก้าอี้ที่เหมาะสมกับการทำงานอยู่กับที่ และมีลักษณะค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่กำหนด โดยการเลือกซื้อเก้าอี้ สามารถปรับค่าความสูงจากพื้นถึงที่รองนั่งได้ อยู่ในช่วงความสูงขนาด 46.00 ถึง 60.00 เซนติเมตร สามารถปรับความสูงได้ตามขนาดของต้นขาของพนักงานในขณะนั่งทำงาน



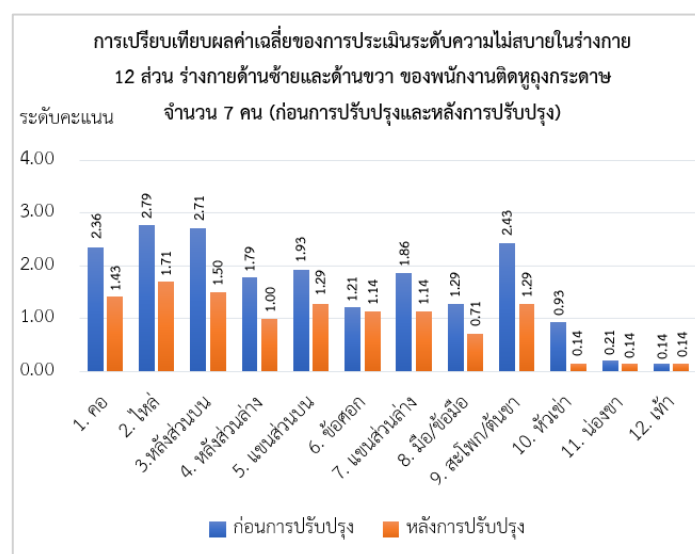
ภาพที่ 11 เก้าอี้บาร์เตี้ย

ผลการดำเนินงานวิจัย

การปรับปรุงท่าทางการทำงานสำหรับกระบวนการติดหูกระจกกระจก โดยนำหลักการยศาสตร์เข้ามาช่วยในการปรับปรุงโต๊ะทำงานและเก้าอี้ทำงาน วัตถุประสงค์เพื่อลดความเมื่อยล้าในการทำงานของพนักงานพนักงานติดหูกระจกกระจกด้วยเทคนิค RULA สามารถวัดผลในการดำเนินงานวิจัยได้ ดังต่อไปนี้

การวัดผลจากแบบสอบถามประเมินระดับความไม่สบายในร่างกาย 12 ส่วน

การวัดผลจากแบบสอบถามประเมินระดับความไม่สบายในร่างกาย 12 ส่วน สามารถสรุปผลการประเมินความเสี่ยงในการทำงานด้านหลักการยศาสตร์ หลังการปรับปรุง มีคะแนนเฉลี่ยกลุ่ม A คือ 5 คะแนน และผลคะแนนเฉลี่ยกลุ่ม B คือ 6.14 ดังตารางที่ 4 ผู้วิจัยดำเนินการเปรียบเทียบผลก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงอุปกรณ์การทำงาน จากข้อมูลค่าเฉลี่ยในการประเมินระดับความไม่สบายในร่างกาย 12 ส่วน ของร่างกายด้านซ้ายและด้านขวา ของพนักงานติดหูกระจกกระจกจำนวน 7 คน แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบผลค่าเฉลี่ยของการประเมินระดับความไม่สบายในร่างกาย 12 ส่วน ร่างกายด้านซ้ายและด้านขวา ของพนักงานติดหูกระจกกระจกจำนวน 7 คน (ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง)

ตารางที่ 4 การประเมินความเสี่ยงในการทำงานด้านหลักการยศาสตร์ ด้วยเทคนิค RULA (หลังการปรับปรุง)

การประเมินคะแนนกลุ่ม	คะแนน ความ รุนแรง คนที่ 1	คะแนน ความ รุนแรง คนที่ 2	คะแนน ความ รุนแรง คนที่ 3	คะแนน ความ รุนแรง คนที่ 4	คะแนน ความ รุนแรง คนที่ 5	คะแนน ความ รุนแรง คนที่ 6	คะแนน ความ รุนแรง คนที่ 7	คะแนน เฉลี่ย
การประเมินคะแนนกลุ่ม A (แขน ข้อมือ)	5.00 คะแนน	5.00 คะแนน	5.00 คะแนน	5.00 คะแนน	5.00 คะแนน	5.00 คะแนน	5.00 คะแนน	5.00 คะแนน
การประเมินคะแนนกลุ่ม B (คอ ลำตัว ขา)	6.00 คะแนน	7.00 คะแนน	6.00 คะแนน	6.00 คะแนน	6.00 คะแนน	6.00 คะแนน	6.00 คะแนน	6.14 คะแนน

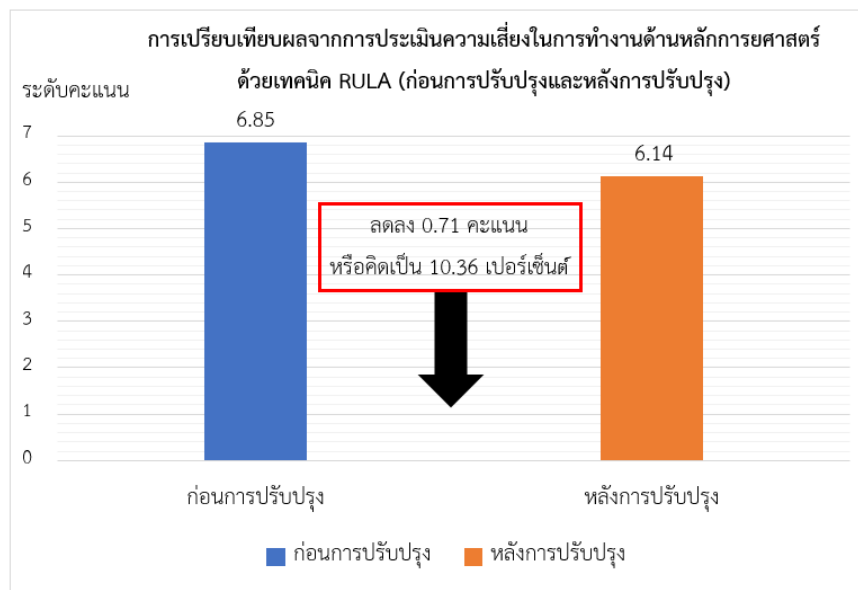
จากภาพที่ 12 ข้อมูลค่าเฉลี่ยในการประเมินระดับความไม่สบายในร่างกาย 12 ส่วน ร่างกายด้านซ้ายและด้านขวา ของพนักงานติดหูกระจกตาจำนวนทั้งหมด 7 คน นำข้อมูลค่าเฉลี่ย มาเปรียบเทียบผลก่อนการปรับปรุงและหลังจากการปรับปรุงอุปกรณ์การทำงานของพนักงานติดหูกระจกตา ในรูปแบบตารางการเปรียบเทียบข้อมูล แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบผลค่าเฉลี่ยก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง จากการประเมินระดับความไม่สบาย ในร่างกาย 12 ส่วนร่างกายด้านซ้ายและด้านขวา ของพนักงานติดหูกระจกตาจำนวน 7 คน

รายการในการประเมินร่างกาย	ระดับคะแนน			เปอร์เซ็นต์ที่ลดลง
	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง	คะแนนที่ลดลง	
1. คอ	2.36	1.43	0.93	39.40%
2. ไหล่	2.79	1.71	1.08	38.46%
3. หลังส่วนบน	2.71	1.50	1.21	44.74%
4. หลังส่วนล่าง	1.79	1.00	0.79	44.00%
5. แขนส่วนบน	1.93	1.29	0.64	33.33%
6. ข้อศอก	1.21	1.14	0.07	5.88%
7. แขนส่วนล่าง	1.86	1.14	0.72	38.46%
8. มือหรือข้อมือ	1.29	0.71	0.58	44.44%
9. สะโพกหรือต้นขา	2.43	1.29	1.14	47.06%
10. หัวเข่า	0.93	0.14	0.79	84.62%
11. น่องขา	0.21	0.14	0.07	33.33%
12. เท้า	0.14	0.14	0.00	0.00%

การวัดผลจากการประเมินความเสี่ยงในการทำงานด้านหลักการยศาสตร์ ด้วยเทคนิค RULA

จากการศึกษากระบวนการติดหูกระจกตา โดยมีการนำหลักการยศาสตร์ เข้ามาปรับปรุงอุปกรณ์การทำงาน เพื่อลดความเมื่อยล้าในการทำงานของพนักงานติดหูกระจกตา และมีการประเมินความเสี่ยงในการทำงานด้านหลักการยศาสตร์ ด้วยเทคนิค RULA การเปรียบเทียบผลการประเมินด้วยเทคนิค RULA แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การเปรียบเทียบผลจากการประเมินความเสี่ยงในการทำงานด้านหลักการยศาสตร์ ด้วยเทคนิค RULA (ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง)

จากภาพที่ 13 การประเมินความเสี่ยงในการทำงานด้านหลักการยศาสตร์ ด้วยเทคนิค RULA ก่อนการปรับปรุง มีระดับคะแนนที่ 6.85 คะแนน หลังจากการนำหลักการยศาสตร์เข้ามาปรับปรุงอุปกรณ์การทำงานสำหรับกระบวนการติดहुงกระดาศ ผลการประเมินด้วยเทคนิค RULA หลังการปรับปรุง มีระดับคะแนนที่ 6.14 ลดลง จากเดิม 0.71 คะแนน หรือ คิดร้อยละ 10.36

สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาท่าทางการทำงานสำหรับกระบวนการติดहुงกระดาศ แล้วนำหลักการยศาสตร์เข้ามาปรับปรุง อุปกรณ์การทำงาน วัตถุประสงค์เพื่อลดความเมื่อยล้าในการทำงานของพนักงานติดहुงกระดาศและเพื่อประเมินความเสี่ยงในการทำงานด้วยเทคนิค RULA ซึ่งหลังจากการปรับปรุงโต๊ะทำงานและเก้าอี้นั่งทำงานสำหรับพนักงานติดहुงกระดาศ แล้วให้ พนักงานจำนวน 7 คน ประเมินระดับความไม่สบายในร่างกายด้านซ้ายและด้านขวา ค่าเปอร์เซ็นต์ระดับความรู้สึกไม่สบาย ลดลง ดังต่อไปนี้ หัวเข่าลดลง 84.62% สะโพกหรือต้นขาลดลง 47.06% หลังส่วนบนลดลง 44.74% มือหรือข้อมือลดลง 44.44% หลังส่วนล่างลดลง 44.00% คอลดลง 39.40% ไหล่ลดลง 38.46% แขนส่วนล่างลดลง 38.46% แขนส่วนบนลดลง 33.33% น่องขาลดลง 33.33% ข้อศอกลดลง 5.88% และเท้าลดลง 0.00% ตามลำดับ และการประเมินความเสี่ยงในการทำงานด้านหลักการยศาสตร์ ด้วยเทคนิค RULA ก่อนการปรับปรุง มีระดับคะแนนที่ 6.85 คะแนน หลังการปรับปรุง อุปกรณ์ในการทำงานของพนักงานติดहुงกระดาศแล้ว มีระดับคะแนนที่ 6.14 คะแนน ลดลงจากเดิม 0.71 คะแนน หรือ คิดเป็นร้อยละ 10.36 จากการประเมินด้วยเทคนิค RULA ก่อนและหลังการปรับปรุง ผลคะแนนความเสี่ยงอยู่ในระดับ เดียวกัน หากต้องการลดระดับคะแนนความเสี่ยงลง ควรทำการศึกษาถึงวิธีการทำงานของพนักงานเพิ่มเติม เพื่อปรับปรุงให้ ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กิตติ อินทรานนท์. (2548). *การยศาสตร์ Ergonomics*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
งานด้านการยศาสตร์ ในประเทศ. (2557). *หลักการประเมินด้านการยศาสตร์ Ergonomics assessment*. <https://thai-ergonomic-assessment.blogspot.com/2014/07/rula.html>

- วรวิทย์ ลีลาวรรณ และ คณะ. (2563). การปรับปรุงสถานงานโดยใช้หลักการยศาสตร์ : กรณีศึกษาร้านขนมโดนัท. *วารสารวิจัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร*, 3(1).
- ธีระพงษ์ ทับพร. (2563) การปรับปรุงท่าทางการทำงานของพนักงานบรรจุท่อพีวีซีโดยใช้หลักการยศาสตร์ กรณีศึกษา: บริษัทอุตสาหกรรมท่อน้ำไทย จำกัด. *Journal of Science and Technology Thonburi University*. 4(1).
- McAtamney, L. & Corlett, E. N. (1993). A Survey Method For the Investigation of work Related Upper Limb Disorders : RULA. *Applied Ergonomics*, 24. 91-99.
- Hignett, S., & McAtamney, L. (2000). Rapid Entire Body Assessment, REBA. *Applied Ergonomics*, 31. 201-205.
- Kuorinka, I., Jonsson, B., Kilbom, A., Vinterberg, H., Biering-Sørensen, F., Andersson, G., & Jørgensen, K. (1987). Standardised Nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms. *Applied Ergonomics*, 18(3)

Translated Thai References

- Intaranont, K. (2005). *Ergonomics*. Chulalongkorn University Press.
- Thai Ergonomics Assessment. (2014). *Principles of Ergonomics Assessment*. <https://thai-ergonomic-assessment.blogspot.com/2014/07/rula.html>
- Leelawan, W., et al. (2020). The Development Workstation by Ergonomic A Case Study at Donut Shop. *Industrial Technology Research Journal Phranakhon Rajabhat University*, 3(1).
- Tubpond, T. (2020). Postural Improvement of the Employees in PVC Pipe Packing Process by Using the Principle of Ergonomics Case Study: Thai Pipe Industry Co., Ltd. *Journal of Science and Technology, Thonburi University*, 4(1).

Received: Mar 27, 2025

Revised: Dec 26, 2025

Accepted: Dec 26, 2025

การลดปริมาณผลิตภัณฑ์บกพร่องในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับแป้นเกลียว เชื่อม M12x1.25 มิลลิเมตร ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม

DEFECT REDUCTION IN SPOT WELDING PROCESS FOR M12x1.25mm WELD NUTS USING ENGINEERING EXPERIMENTAL DESIGN TECHNIQUES

ศุภพัชร ศิลาลอย สุภัทรา หมูป่าร้าง*

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

Supat Silaloy, Supatthra Muparang*

¹Department of Industrial Engineering and Logistics, School of Engineering and Innovation, Rajamangala
University of Technology Tawan-ok

*Corresponding author: Email: supattra_mu@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณผลิตภัณฑ์บกพร่องจากข้อเรียกร้องของลูกค้าเกี่ยวกับปัญหาแป้นเกลียวเชื่อมหลุด ในผลิตภัณฑ์คานรองรับกระบะรถยนต์ กระบวนการวิจัยได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลต่อปัญหาแป้นเกลียวหลุด ได้แก่ ปริมาณกระแสไฟฟ้า เวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงาน และแรงกดของหัวทาบ ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติพบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด คือ กระแสไฟฟ้า 14 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 12 ไซเคิล และแรงกดหัวทาบ 4,000 นิวตัน เมื่อนำพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมาใช้ในกระบวนการผลิตจริงพบว่า ช่วยลดสัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทแป้นเกลียวหลุดจากเดิม 42 ชิ้น (0.34%) เหลือ 0 ชิ้น ส่งผลให้ไม่มีข้อบกพร่องในประเภทดังกล่าวอีกต่อไป และเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: พารามิเตอร์ที่เหมาะสม, กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด, การออกแบบการทดลอง

Abstract

This research aims to reduce the number of defective products resulting from customer complaints regarding the detachment of welded nuts in automotive truck bed support beams. The study applies engineering experimental design techniques to determine the optimal parameters for the resistance spot welding process. The key parameters affecting the issue of nut detachment include welding current, welding time, and electrode force. Statistical analysis results indicate that the optimal parameters for the resistance spot welding process are a welding current of 14 kA, a welding time of 12 cycles, and an electrode force of 4,000 N. When these optimal parameters were implemented in actual production, the number of defective products due to nut detachment decreased from 42 pieces (0.34%) to 0 pieces. This effectively eliminated defects of this type and significantly improved customer satisfaction.

Keywords: Optimal parameter, Resistance Spot Welding, Design of Experiment

บทนำ

เนื่องด้วยทางบริษัทแห่งหนึ่งที่ตั้งอยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ส่งให้ลูกค้า ในงานการทำแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปชิ้นส่วนรถยนต์ ตัวถังรถยนต์และรถบรรทุก รวมถึงหมอน้ำเครื่องจักรกลการเกษตรและอื่นๆ ปัจจุบันทาง

บริษัทมีผลิตภัณฑ์อยู่ 3 ประเภท คือ ประเภทที่ 1 ผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนงานปั๊ม ประเภทที่ 2 ผลิตภัณฑ์ตัวถังรถยนต์ เป็นกระบวนการที่นำชิ้นส่วนจากงานปั๊มมาประกอบเข้าด้วยกันให้เป็นผลิตภัณฑ์ตามที่ลูกค้าต้องการ และประเภทที่ 3 ผลิตภัณฑ์ตัวถังรถบรรทุกที่มีการประกอบและทำสี EDP (Electro Deposition Point) ตามที่ลูกค้ากำหนด

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ประเภทชิ้นส่วนนั้นมีความหลากหลายของตัวชิ้นงานที่ต้องนำมาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งกระบวนการประกอบที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ คือ การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding) ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในการประกอบชิ้นส่วนแต่ละชิ้นให้ยึดติดกันเป็นชิ้นเดียว โดยกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ใช้ในการยึดชิ้นส่วนเป็นเกลียวเชื่อม (Nut Weld) ให้ติดกับชิ้นงาน ขนาดแป้นเกลียวเชื่อมนั้นมีขนาดที่แตกต่างกันออกไป ตั้งแต่ขนาด M5 ถึง M12 ตามมาตรฐาน TSB1503G (Toyota Motor Corporation, 2007) ซึ่งที่ผ่านมาพบว่าแป้นเกลียวเชื่อมที่ติดกับชิ้นงานนั้นเกิดการหลุดออกจากชิ้นงาน และส่งผลกระทบต่อลูกค้า โดยเมื่อส่งชิ้นงานที่มีการประกอบแป้นเกลียวเชื่อมให้กับลูกค้าพบว่าชิ้นงานที่นำเข้าไปประกอบในสายการผลิตของลูกค้านั้นเกิดการหลุดของแป้นเกลียวเชื่อม ส่งผลให้สายการผลิตของลูกค้าต้องหยุดชะงัก และต้องนำชิ้นงานดังกล่าวออกมาซ่อมแซมแก้ไข และมีการเรียกร้องจากลูกค้าให้มีการแลกเปลี่ยนชิ้นงานใหม่มาแทนที่ชิ้นงานที่มีข้อบกพร่อง และชิ้นงานที่มีในสต็อก (Stock) ของลูกค้า เพื่อให้ทางฝ่ายประกันคุณภาพของบริษัทนั้นทำการตรวจสอบและยืนยันผลว่าชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องนั้นได้ผ่านการตรวจสอบคุณภาพและทำการส่งชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบเข้าไปยังสต็อกของลูกค้าใหม่ ซึ่งลักษณะการเกิดปัญหานี้เกิดเป็นของเสียจำนวนมากและเสียเวลาในการตรวจสอบและแก้ไขเพื่อยืนยันคุณภาพ ซึ่งทางลูกค้าได้กำหนดเป้าหมายของอัตราการแลกเปลี่ยนชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องไว้ไม่เกิน 3PPM (Parts Per Million) ต่อเดือน ซึ่งทางบริษัทต้องควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ให้อยู่ในเป้าหมายจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ทางผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะแก้ไขปัญหาเหล่านี้ โดยทำการศึกษากาการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อทำการควบคุมพารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อมจุดแบบความต้านทาน ซึ่งจะส่งผลให้ชิ้นงานที่ผลิตออกมามีคุณภาพตามที่กำหนดได้

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. กระบวนการเชื่อมแบบความต้านทาน (Resistance Welding Process) (Aslanlar, 2006)

การเชื่อมแบบความต้านทานเป็นการเชื่อมที่ใช้ความร้อนและแรงกด ซึ่งได้รับความร้อนจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อของชิ้นงาน ความต้านทานของรอยต่อของโลหะชิ้นงานจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเพียงพอที่จะทำให้โลหะร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้โลหะอยู่ในสภาวะพลาสติก (Plastic State) และเริ่มอยู่ในสภาพหลอมละลาย จากนั้นเมื่อโลหะที่อยู่ในสภาวะดังกล่าวได้รับแรงกดเข้าด้วยกันจะทำให้โลหะทั้งสองหลอมละลายติดกัน หลังจากเมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โลหะจะเย็นตัวลงอยู่ในสภาวะของแข็งทำให้ได้รอยเชื่อมตามต้องการ การเชื่อมด้วยความต้านทานเป็นที่ยอมรับเนื่องจากเชื่อมงานได้รวดเร็ว การบิดงอของโลหะชิ้นงานมีน้อย สามารถปรับปรุงเป็นระบบอัตโนมัติได้ง่ายเมื่อต้องการผลผลิตที่สูง สามารถปรับปรุงให้เป็นส่วนหนึ่งในสายงานประกอบและขึ้นรูปได้ อีกทั้งประหยัดเวลาและเร็วกว่าการเชื่อมอาร์ค

2. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) คือ การทดสอบครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ใด (Outputs or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้นโดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรหรือปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรหรือปัจจัยที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or Noise Variables Factors) โดยทั่วไปแล้วตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวแปรรบกวน (Noise Variables)

3. วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM)

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรและมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนอง โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปของกราฟฟิก เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวตอบสนอง

โดยที่ปัญหาส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ อาจจะเป็นแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้เป็นแบบจำลองกำลังหนึ่ง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Qiu et al. ทำการเชื่อมอลูมิเนียมผสมเกรด A5052 เข้ากับแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCC และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ด้วย การเชื่อมตันทนแบบจุด และทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อเกลียวกลองจุลทรรศน์แบบสอง กวาด ความแข็งแรงของรอยต่อทำการศึกษาด้วยการทดสอบแรงดึงแบบกากบาท และทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อเกลียวและความแข็งแรงของรอยต่อ ผลการทดลองพบว่า ความแข็งแรงมี ความสัมพันธ์โดยตรงกับชั้นสารประกอบกึ่งโลหะ (Qiu et al., 2010) ที่เกิดการก่อตัวขึ้นบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อส่วน ชั้นสารประกอบกึ่งโลหะที่ไม่ต่อเนื่องส่วนมากพบที่บริเวณขอบของรอยต่อและหากส่วนที่ไม่ต่อเนื่องนี้มีคามากจะทำให้ความ แข็งแรงของรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้น

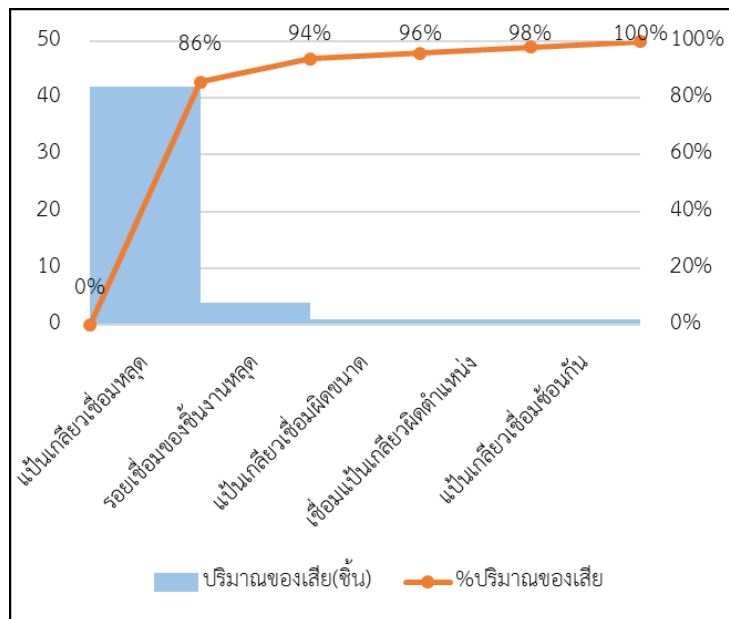
Aslanlar et al. ทำการศึกษาค่าอิทธิพลของกระแสการเชื่อมตันทนแบบจุดที่มีผลต่อสมบัติทางกลของแผ่นเหล็ก เคลือบสังกะสีและโครไมต์ (Aslanlar et al., 2007) ความหนาของแผ่นเหล็กมีค่า 1.2 มม. เครื่องเชื่อมตันทนแบบจุดเป็น เครื่องเชื่อมที่สามารถควบคุมเวลาและกระแสไดขนาด 120 kVA ช่วงเวลาการเชื่อม มีค่า 5-15 ไซเคิล กระแสเชื่อม 4-12 kA แรงกดต่อเล็กโทรดมีค่าคงที่ 6 kN และนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการทดสอบแรงดึงเฉือนและลอกผิว เพื่อหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสม ผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุดหาได้จากเมื่อเชื่อมด้วยกระแส 10 kA 15 ไซเคิล ความลึกของการ ซึมลึกมีค่า 15% ของความหนาวัสดุ แต่ไม่เกิน 20% เพื่อทำให้ได้ผิวหนาแนวเชื่อมที่มีคุณภาพ ค่าผิวหนาแนวเชื่อมที่ดีที่สุดพบ ได้ เมื่อทำการเชื่อมด้วยกระแส 10 kA 10 ไซเคิล และกระแส 9 kA 12 ไซเคิล ซึ่งทำให้เกิดการซึมลึกประมาณ 8% ของความ หนา ขณะที่ค่าความแข็งแรงของการลอกผิวพบได้ที่แนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแส 11 kA 10 ไซเคิล ความแข็งแรงที่ได้มีค่า ประมาณครึ่งหนึ่งของค่าความแข็งแรงเฉือน ค่าสถานะการเชื่อมที่แนะนำให้ใช้เพื่อให้ได้การซึมลึกประมาณ 8% ของความ หนาวัสดุ คือ กระแส 11 kA 10 ไซเคิล

การดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมแบบจุด เริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการศึกษาเก็บ รวบรวมข้อมูล และขั้นตอนการดำเนินงาน ซึ่งปัจจุบันบริษัทผลิตคานรองรับกระบะรถยนต์ส่งให้ลูกค้าต่าง ๆ จากการเก็บ ข้อมูลข้อร้องเรียนจากลูกค้า ผลิตภัณฑ์มีข้อบกพร่องจากลูกค้าเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2567 ปรากฏว่า ผลิตภัณฑ์คานรองรับ กระบะรถยนต์มีข้อร้องเรียนมากที่สุด คือ ปัญหาแป้นเกลียวเชื่อมหลุดทั้งหมด เป็นจำนวน 42 ชิ้น ส่งผลให้มีการหยุดไลน์การ ผลิตของลูกค้าเพื่อแก้ไขปัญหาและยังมีปัญหารอยเชื่อมของชิ้นงานหลุด 4 ชิ้น ปัญหาแป้นเกลียวเชื่อมผิดขนาด 1 ชิ้น ปัญหา การเชื่อมแป้นเกลียวผิดตำแหน่ง 1 ชิ้น ปัญหาแป้นเกลียวเชื่อมซ้อนกัน 1 ชิ้น ซึ่งในช่วงเดือนพฤศจิกายน มีการผลิตคาน รองรับกระบะรถยนต์จำนวน 14,300 ชิ้น และมีของเสียเกิดขึ้น คิดเป็น 0.34 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 1 และแสดงดังภาพที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณของเสียเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2567

ลักษณะข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์	ปริมาณของเสีย(ชิ้น)
แป้นเกลียวเชื่อมหลุด	42
รอยเชื่อมของชิ้นงานหลุด	4
แป้นเกลียวเชื่อมผิดขนาด	1
การเชื่อมแป้นเกลียวผิดตำแหน่ง	1
แป้นเกลียวเชื่อมซ้อนกัน	1



ภาพที่ 1 กราฟฟาเรโตแสดงปริมาณของเสีย เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2567

ผู้วิจัยจึงเลือกปัญหาผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทแผ่นเกลียวเชื่อมหลุดของผลิตภัณฑ์คานรองรับกระเบมาดำเนินการแก้ไข ซึ่งมีลักษณะรอยเชื่อมแผ่นเกลียวติดอยู่กับชิ้นงาน ซึ่งใช้แผ่นเกลียวขนาด M12x1.25 มิลลิเมตร มีรอยของการหลอมละลายแผ่นเกลียวติดอยู่ แต่แผ่นเกลียวเชื่อมหลุดออก แสดงดังภาพที่ 2 จากปัญหาดังกล่าวต้องทำการวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาแผ่นเกลียวเชื่อมหลุด ซึ่งผู้วิจัยได้หารือกับทีมงานวิศวกรของบริษัท ปัญหาอาจเกิดจากพารามิเตอร์ของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดไม่คงที่ (สุรพงศ์ & เสกสันต์, 2553; สิทธิพงศ์, 2558) ไม่มีมาตรฐานในการทำงาน เนื่องจากในรายงานการผลิตระดับพารามิเตอร์การเชื่อมความต้านทานแบบจุดมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับผู้ปฏิบัติงานจะตั้งค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมประกอบและบริษัทไม่มีแนวทางการทำงานที่ถูกกำหนดขึ้นให้เป็นมาตรฐานในกระบวนการผลิต (SOP) ผู้วิจัยจึงกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในทดลอง ได้แก่ กระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื่อม ระยะเวลาที่ใช้เชื่อม และแรงกดของหัวทูปที่ใช้ในการเชื่อม ดังตารางที่ 2 ซึ่งได้มาจากการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง ข้อมูลจากการทดลองตามแผนการทดลองเชิงสถิติด้วยเทคนิค CCD ของกระบวนการผลิตการเชื่อมแผ่นเกลียว หลังจากประมวลผลระดับของพารามิเตอร์ในการทดลองแล้ว จะได้แผนการทดลองจำนวน 40 ชุด คือ ทดลองจำนวน 2 ครั้ง แสดงข้อมูลการทดลองได้ดังตารางที่ 3 โดยผลตอบสนอง Tensile คือ ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อม



ภาพที่ 2 ลักษณะแผ่นเกลียวเชื่อมหลุดของผลิตภัณฑ์คานรองรับกระเบ

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์สำคัญตามการทดลอง CCD

ระดับ	กระแสไฟฟ้า (kA.) : I	ระยะเวลา (Cycles) : T	แรงกด (F) : N
ระดับ 1	11	5	1800
ระดับ 2	12	7	2500
ระดับ 3	13	10	3500
ระดับ 4	14	13	4500
ระดับ 5	15	15	5200

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์และผลการทดลอง

ลำดับ	I กระแส (kA)	T เวลา (Cycles)	F แรงกด (F)	Y Tensile (kN)
1	12	13	4500	13.36
2	13	10	3500	18.31
3	12	7	2500	14.30
4	13	10	3500	17.90
5	12	7	4500	8.14
6	13	10	3500	17.83
7	14	7	2500	17.45
8	13	15	3500	18.47
9	14	13	4500	16.36
10	14	13	2500	15.95
11	13	10	3500	18.12
12	13	10	1818	14.03
13	12	13	2500	14.43
14	14	7	2500	16.60
15	11	19	3500	8.21
16	12	13	2500	16.52
17	14	7	4500	15.36
18	13	10	5182	13.18
19	12	13	4500	16.67
20	11	10	3500	8.46
21	13	10	5182	18.42
22	12	7	2500	14.66
23	15	10	3500	20.30
24	13	15	3500	19.07
25	14	7	4500	15.00
26	13	10	3500	18.58

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์และผลการทดลอง (ต่อ)

ลำดับ	I กระแส (kA)	T เวลา (Cycles)	F แรงกด (F)	Y Tensile (kN)
27	14	13	2500	16.18
28	13	10	3500	18.45
29	13	5	3500	11.94
30	14	13	4500	18.98
31	13	10	3500	18.38
32	13	10	3500	18.50
33	13	10	3500	18.30
34	13	10	3500	18.45
35	13	10	3500	18.30
36	13	5	3500	12.08
37	15	10	3500	20.12
38	13	10	1818	14.06
39	13	10	3500	18.60
40	12	7	4500	8.08

สรุปผลการทดลอง

หลังจากทดลองเชื่อมตามการทดลองได้นำชิ้นงานมาทดสอบ ตามมาตรฐานการทดสอบแป้นเกลียวเชื่อมด้วยแรงบิดมาตรฐาน TSB1503G ดังภาพที่ 3 และการวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ (Statistical Analysis) ตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) (Montgomery, 2005) นั้น สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังภาพที่ 4 พบว่าเมื่อพิจารณาที่ตัวแปรตอบสนอง คือ ความแข็งแรงของรอยเชื่อมพบว่าปัจจัยที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งได้แก่ ปัจจัยหลัก (main effect) จำนวน 2 ปัจจัย คือ กระแสไฟฟ้า (I) และเวลาเชื่อม (T) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ กระแสไฟฟ้า และเวลาเชื่อม (p-value < 0.05)

สมการแสดงปัญหาของแป้นเกลียวเชื่อมหลุด เป็นผลลัพธ์ของการผลิตผลิตภัณฑ์คานรองรับกระบะรถยนต์ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กระแสไฟฟ้า เวลาเชื่อม และแรงกดหัวทาบ สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{Tensile (kN)} = & -258.6 + 38.05 \text{ Current (I)} + 4.78 \text{ Welding Time (T)} \\
 & - 0.00686 \text{ Electrode Force(F)} - 1.380 \text{ Current (I)*Current (I)} \\
 & - 0.1094 \text{ Welding Time (T)*Welding Time (T)} \\
 & - 0.000001 \text{ Electrode Force(F)*Electrode Force(F)} \\
 & - 0.265 \text{ Current (I)*Welding Time (T)} + 0.000824 \text{ Current (I)} \\
 & * \text{Electrode Force(F)} + 0.000390 \text{ Welding Time (T)*Electrode Force(F)}
 \end{aligned} \tag{1}$$

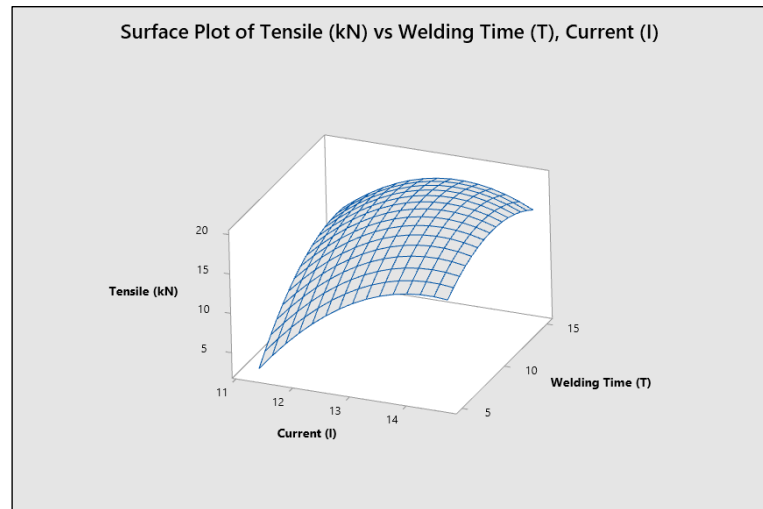


ภาพที่ 3 การทดสอบแป้นเกลียวเชื่อมด้วยแรงดึงของลูกค้ำตามมาตรฐาน TSB1503G

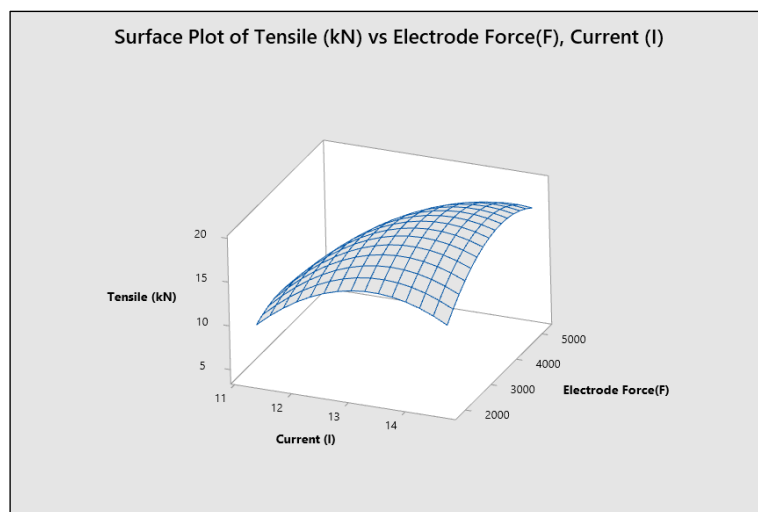
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	368.153	40.906	17.47	0.000
Linear	3	223.690	74.563	31.84	0.000
Current (I)	1	157.854	157.854	67.40	0.000
Welding Time (T)	1	63.352	63.352	27.05	0.000
Electrode Force(F)	1	2.484	2.484	1.06	0.311
Square	3	101.559	33.853	14.45	0.000
Current (I)*Current (I)	1	54.889	54.889	23.44	0.000
Welding Time (T)*Welding Time (T)	1	27.958	27.958	11.94	0.002
Electrode Force(F)*Electrode Force(F)	1	38.130	38.130	16.28	0.000
2-Way Interaction	3	42.904	14.301	6.11	0.002
Current (I)*Welding Time (T)	1	10.144	10.144	4.33	0.046
Current (I)*Electrode Force(F)	1	10.857	10.857	4.64	0.039
Welding Time (T)*Electrode Force(F)	1	21.902	21.902	9.35	0.005
Error	30	70.264	2.342		
Lack-of-Fit	5	44.012	8.802	8.38	0.000
Pure Error	25	26.252	1.050		
Total	39	438.417			

ภาพที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลอง

ในส่วนของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง ในภาพที่ 5 และภาพที่ 6 ระหว่างกระแสไฟฟ้า เวลาเชื่อม และแรงกดหัวทียของแรงดึงสูงสุด จะเห็นว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าและเวลาเชื่อมเพิ่มเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นในส่วนองแรงกดหัวทียส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมไม่มาก

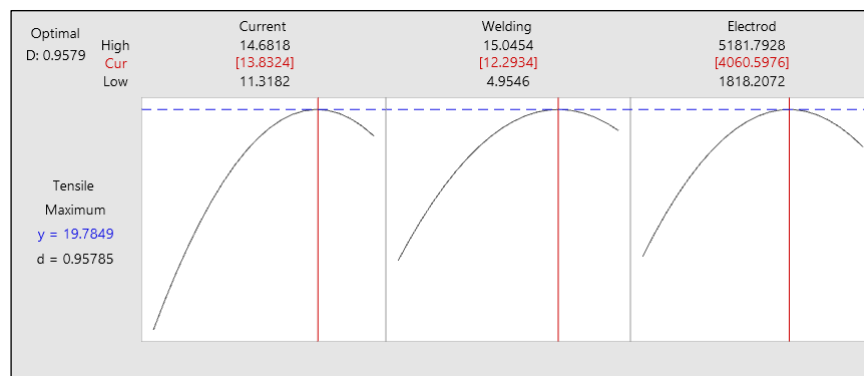


ภาพที่ 5 Response surface for interaction effect of welding time and current on tensile



ภาพที่ 6 Response surface for interaction effect of electrode force and current on tensile

การวิเคราะห์หาสภาวะพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Parameters Optimization) ของการลดปัญหาผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทแป้นเกลียวเชื่อมหลุดของผลิตภัณฑ์คานรองรับกระบะ ดังแสดงในภาพที่ 7 จะเห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของผลิตภัณฑ์คานรองรับกระบะ คือ กระแสไฟฟ้า 14 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 12 วินาที และแรงกดหัวทูป 4,000 นิวตัน ซึ่งจะทำให้ไม่พบปัญหาผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทแป้นเกลียวเชื่อมหลุดของผลิตภัณฑ์คานรองรับกระบะ ผู้วิจัยจึงใช้พารามิเตอร์ที่ได้ ทดลองผลิตสินค้าจริง จำนวน 100 ชิ้น [10] ไม่พบชิ้นงานแป้นเกลียวเชื่อมหลุดอีก



ภาพที่ 7 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของพารามิเตอร์

อภิปรายผล

จากการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง พบว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟฟ้า เวลาเชื่อม และแรงกดหัวทูป มีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม (Mekboon & Plongmai, 2016; Manochai & Jongprasithporn, 2012) เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ (Parameters Optimization) สำหรับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด คือ กระแสไฟฟ้า 14 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 12 วินาที และแรงกดหัวทูป 4,000 นิวตัน นำมาทดลองผลิตสินค้าจริง จำนวน 100 ชิ้น ไม่พบชิ้นงานแป้นเกลียวเชื่อมหลุด หลังจากนั้นสร้างเป็นมาตรฐานการทำงาน (Standard and Operation : S&OP) สำหรับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดของผลิตภัณฑ์คานรองรับกระบะ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาที่กรุณาให้การสนับสนุนและการช่วยเหลือด้านการเก็บข้อมูลชิ้นงานตัวอย่าง ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้งานโปรแกรม Minitab สำหรับวิเคราะห์ข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

- Aslanlar, A., Qgur, A., Ozasarac, U., Ilhan, E., & Demir, Z. (2007). Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding. *Materials and Design*, 28, 2–7.
- Manochai, S., & Jongprasithporn, S. (2012). Productivity improvement by design and analysis of experiments: Case study: Base of choke up. *The 13th Conference on GRC* (pp.318–329).
- Mekboon, S., & Plongmai, J. (2016). Defects reduction in metal parts production process. *Kasem Bundit Engineering Journal*, 6(1), 91–106.
- Montgomery, D. C. (2005). *Design and analysis of experiments* (6th ed.). John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- Phipatpaiboon, M., & Hongsakornprasert, P. (2016). Defects reduction in a tractor peripheral equipment manufacturing plant using design of experiments technique. *The 12th Conference on NRIC* (pp. 318–329).
- Qiu, R., Shi, H., Zhang, K., Tu, Y., Iwamoto, C., & Satonaka, S. (2010). Interfacial characterization of joint between mild steel and aluminum alloy welded by resistance spot welding. *Materials Characterization*, 61, 684–688.

- Rassamee, S., Srisatyakul, P., & Siwawut, S. (2018, May). Optimization of conditions for strength in bagasse-reinforced concrete forming. *The the 3rd Conference of RMTC* (pp. 314–318).
- Toyota Motor Corporation. (2007). *TSB1503G: Projection weld nuts* (9th ed., pp. 1–7). Toyota Engineering Standards.
- Vural, M., Akkus, A., & Eryurek, B. (2006). Effect of welding nugget diameter on the fatigue strength of the resistance spot welded joints of different steel sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 176, 127–132.
- Sitthiphong, S. (2015). *Reduction of waste in the resistance spot welding process of automotive components*. Department of Industrial Engineering and Production Systems, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- Surapong, C., & Seksan, P. (2010). *Improvement of diode spot welding process using design of experiments: A case study*. Panasonic Electric Works (Thailand) Co., Ltd. Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
- Krungthep. Sarawut, K., & Wirun, P. (2011). *Optimization of cutting accuracy in laser-cut PVC sheet*. Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep.
- Pramote, P., Prokch, S., Sakchai, J., & Kittiphong, K. (2010). *Annual research report 2009: Improvement of FSW joint quality in aluminum alloy 6063-T1 automotive structures using various tool shapes*. Rajamangala University of Technology Thanyaburi.
- Parinya, S. (2003). *Design and analysis of experiments to determine optimal conditions for solder printing and reflow on PCB*. Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.
- Wuttichai, S., Anek, K., & Itsawares, K. (2003). *Shear testing process for resistance spot welding joints*. Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.



JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY THONBURI UNIVERSITY

Thonburi University

248 Phetkasem 110 Nongkhaengplu,
Nongkhaem District, Bangkok - 10160